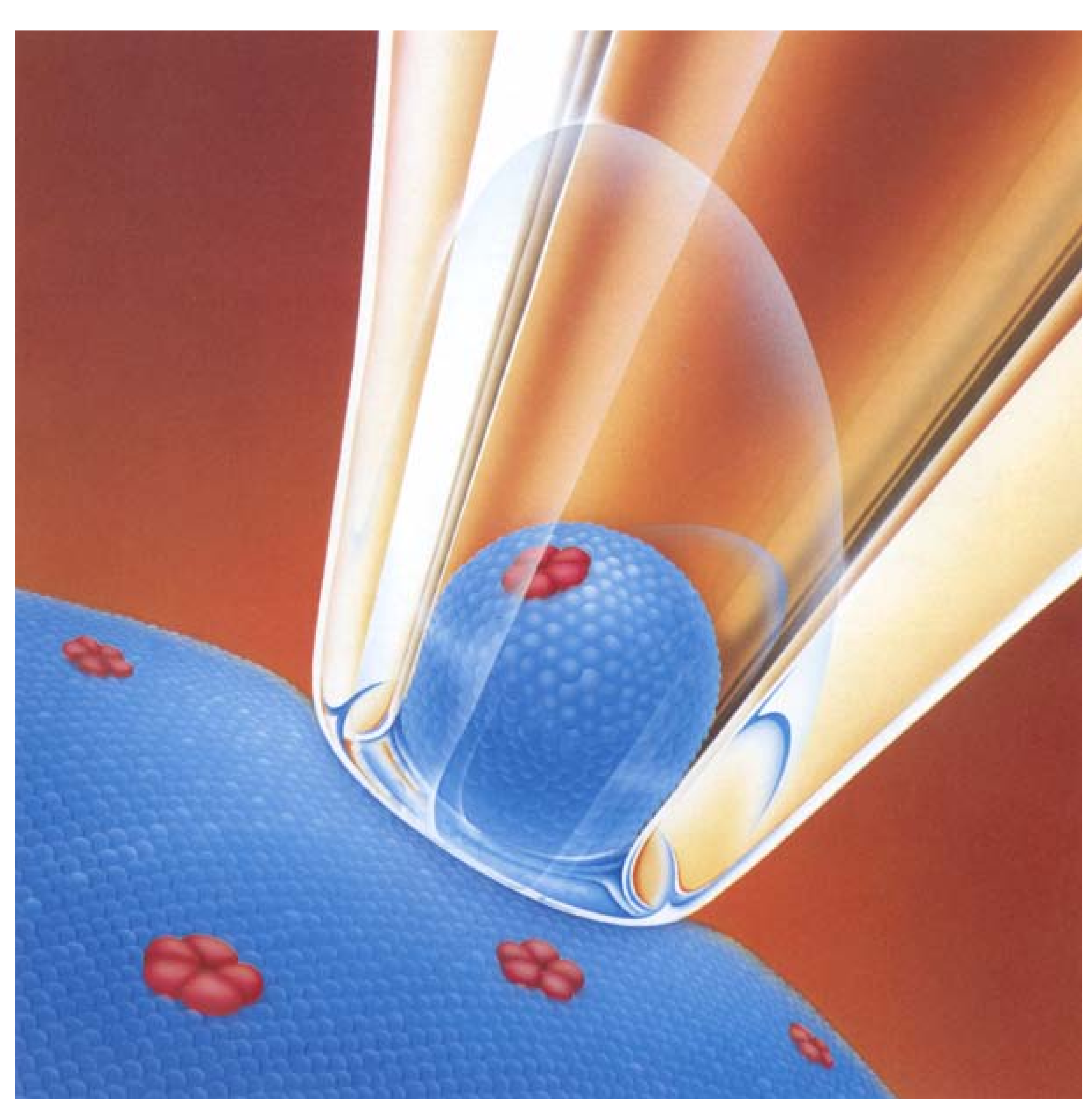
INVESTIGACION y CIENCIA

¿POR QUE EL UNIVERSO NO ES UNIFORME?

FIBRAS SINTETICAS DE TELARAÑA

LA VIA HACIA EL CAPITALISMO DE LOS PAISES DEL ESTE

Edición española de
SCIENTIFIC AMERICAN



PINZAMIENTO DE MEMBRANA

MAYO 1992
600 PTAS.



Mayo de 1992 Número 188

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

J. M. García de la Mora: *Economía de mercado en Polonia*; Esteban Santiago: *La técnica del pinzamiento de membrana*; Ramón Pascual: *Texturas y estructura general del cosmos*; Manuel Ballester: *¿Por qué son estables los compuestos aromáticos?*; Joandomènec Ros: *Telas y sedas de araña*; J. Luis Melena: *El caldero de Gundestrup*; Clemente Moreno: *Atrapando la onda;* J. Vilardell: *Hace...* y *Taller y laboratorio*; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

J. Casares, J. M. V. Martínez, Joandoménec Ros, J. M. García de la Mora y Luis Bou

Ciencia y empresa:

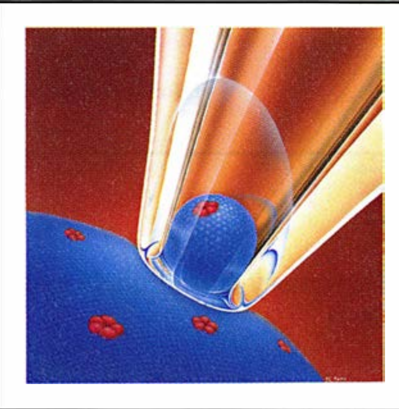
Manuel Puigcerver

Libros:

Ramón Margalef y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
7	Christopher Pillitz/Matrix
9	Chris Niedenthal/Sygma
10	Paula Allen/Matrix (*arriba*), A. Keler/Matrix (*abajo*)
15	Bert Sakmann
16-20	Dana Burns-Pizer
21	Julio M. Fernandex, Mayo Foundation (*izquierda*), W. Almers, Universidad de Washington (*derecha*)
24-25	George P. Efstathiou y Dpto. de Astrofísica de la Univ. de Oxford
26-27	Michael Goodman
28-29	David N. Spergel y Neil G. Turok
30	Marc Skinner
31	David N. Spergel y Neil G. Turok
45	IBM Centro Invest. de Almadén
48	Observatorio Anglo-Australiano (*arriba*) Fritz Vollrath
53	Ian Worpole
54-55	Patricia J. Wynne
56-57	Fritz Vollrath y Donald Edmonds,
58	Univ. de Oxford (*arriba*), Brent Opell, Inst. Politécnico de Virginia (*abajo superior*), Hans Peters, Univ. de Tübingen (*abajo inferior*)
61-65	Expogràfic, S.A. y Montserrat Bach
66	Cedida por J. Miguel Carceller, Control de Calidad e Investigación, S. A. Damm
67	Expogràfic, S. A. y Montserrat Bach
68	Timothy Taylor (*izquierda*), Museo Nacional, Copenhague (*derecha*)
69	Museo Nacional, Copenhague; Kitt Weiss (*foto*)
70	Joe Lemonnier; mapa (*en la dirección de las agujas del reloj, desde arriba, izquierda*): Museo Nacional, Copenhague; Mikhail Rostovtseff; Museo Británico (foto: Timothy Taylor); Museo Nacional, Sophia; Soc. Anticuarios, Londres (de Isla Sark)
71	Erling Benner Larsen, Real Academia de Bellas Artes, Copenhague
72	Museo Nacional, Copenhague (*izda.*), Museo Nacional de la India (*dcha.*)
73	Museo Nac., Copenhague (*arriba*), Timothy Taylor (*abajo, izda.*), Scala/Art Resource (*abajo, centro*), Museo Británico (*abajo, dcha.*)
76-78	George Retseck
79	John Long; cortesía de Peter Michelson, Universidad de Stanford
80-81	George Retseck
82	Ken Rogers/Black Star (*arriba*), Erik Leigh Simmons (*abajo, izda.), Long Photography (abajo, dcha.)*
83	George Retseck (*izda.*), Alex Abramovici, Caltech (*dcha.*)
84	Instituto de Física Cuántica Max Planck, Garching
85	Ray Idaszak y Donna Cox, Centro Nacional para Aplicaciones de Supercomputación
94-97	Jerry Silverman
98	Observatorio Nacional de Kitt Peak
99	Barron Storey
100-104	Documentos Pour la Science



LA PORTADA muestra la técnica del pinzamiento de membrana, mediante la cual una pipeta microscópica atrapa un trozo de membrana celular con sus proteínas incrustadas. Desde hace tiempo, se sospechaba que las proteínas formadoras de poros, al regular el flujo de iones, participaban en la generación de impulsos nerviosos y en el control de la secreción y de otros procesos. Sólo a partir de la introducción de la técnica del pinzamiento ha sido posible analizar la función de las moléculas de los canales iónicos, uno a uno (véase "La técnica del pinzamiento de membrana", de E. Neher y B. Sakmann, en este mismo número).

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48
Fax 419 47 82

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6.600	12.000
Extranjero	7.300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45
Fax 409 70 46



ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Pje. Jansana, 8 Bajos - 08902 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa

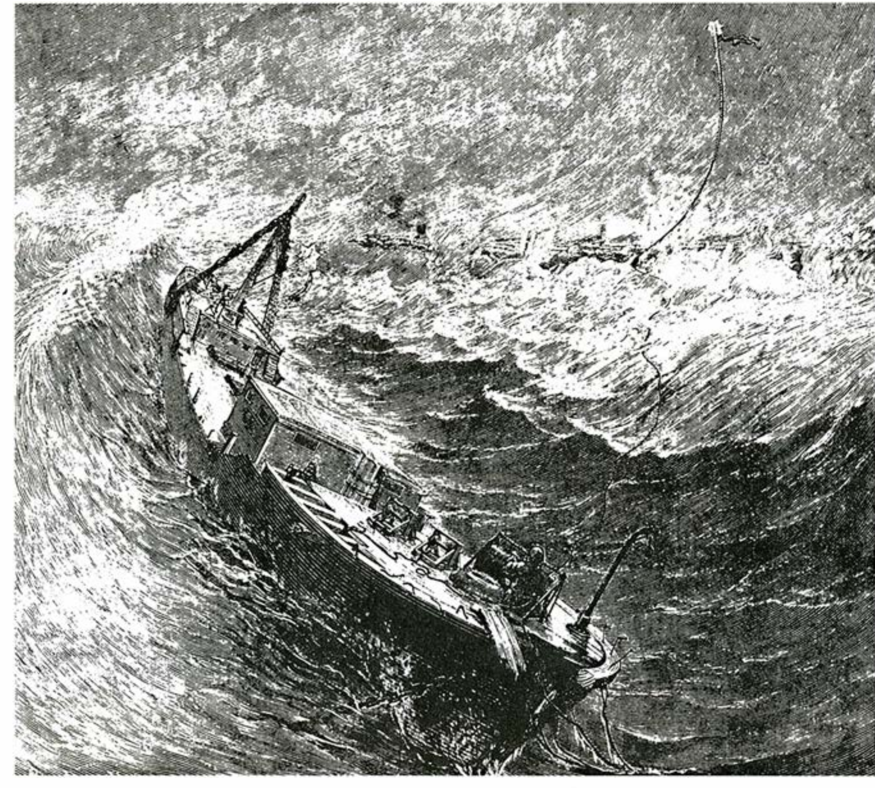
Hace...

... cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «A principios del otoño de 1940 el Comité para la Investigación de Defensa Nacional había fijado sus líneas de acción maestras. Los mejores físicos del país no tardaron en ponerse a trabajar en la aplicación de los últimos descubrimientos de los laboratorios de ciencia pura a la solución de los problemas que plantea la guerra moderna. Naturalmente, esta 'conversión' de físicos no se ha realizado sin trastornar sus ocupaciones de siempre. Hasta hace muy poco, sus principales inquietudes se centraban en el novedoso e importante campo de la desintegración atómica o física nuclear. A causa de la demanda de físicos experimentados para los trabajos militares, hace ya un año que cesó casi toda esa investigación fundamental.»

«El doctor Linus Pauling, del Instituto de Tecnología de California, ha llevado a cabo los ensayos previos de lo que constituye un intento para conseguir algo no logrado hasta ahora: la síntesis en el laboratorio de anticuerpos con fines médicos. Se basa este trabajo en los importantes estudios realizados por el científico acerca de la estructura de las proteínas. Cree el doctor Pauling que las diferencias entre los distintos anticuerpos y las proteínas sanguíneas, con las que guardan tan estrecha semejanza, reside únicamente en la forma en que las cadenas se pliegan sobre sí mismas. Mediante sustancias conocidas, hizo que se desplegaran las cadenas de una proteína sanguínea y luego añadió otro compuesto. Las cadenas proteínicas previamente estiradas volvieron a plegarse poco a poco, utilizando las moléculas de la sustancia recién añadida a modo de hormas en torno a las que arrollarse. Según el doctor Pauling, este proceso se asemeja a lo que acontece cuando las proteínas humanas normales se forman en una sangre contaminada con bacilos de la difteria.»

«En el agua que ha estado congelada se esconden fantasmas de aquel hielo, al igual que en otros líquidos queda alguna leve traza estructural, que es como un vago recuerdo de un antiguo estado sólido cristalino. De este hallazgo científico informa el doctor John G. Kirkwood, profesor de química en la Universidad de Cornell. Explica el doctor Kirkwood que, cuando un sólido se funde, persiste algún vestigio de su organización a escala local. Cada molécula del líquido tiende a retener en sus proximidades un grupo más o menos numeroso de sus antiguos vecinos.»



Cabo de salvamento transportado por una cometa

... cien años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Sir Robert Ball sitúa el fin del mundo, tal como hoy lo conocemos, para dentro de cuatro o cinco millones de años. El calor que según sus cálculos el Sol contenía originalmente podría emitir radiación, al ritmo actual, durante 18.000.000 de años. Se cree que el Sol ha disipado ya unas cuatro quintas partes de su energía original y ello nos lleva a la conclusión de que durará 5.000.000 de años más.»

«Los primeros exploradores de Africa, siguiendo los lechos secos de los ríos para eludir la necesidad de abrirse paso con machetes a través de la espesura de las selvas, no prestaban atención a las bolas de barro duro que por millares se veían desparramadas aquí y allí. Pero un día, en que un destacamento de la expedición al Camerún se hallaba explorando lo que en la estación húmeda habría sido un afluente del Nilo, un leñador partió una de aquellas bolas y cuál no sería su sorpresa al ver caer de su interior un animal vivo de aspecto de pez que comenzó a debatirse sobre la arena. Esos habitáculos esféricos de barro se muestran perforados por gran cantidad de agujeritos y cubiertos de una mucosidad que segrega el cuerpo del animal y cuya función es mantener húmeda la bola por dentro, mientras que los orificios sirven a la respiración. Tan insólito animal ha sido bautizado con el nombre de "pez-barro", en razón de sus curiosos hábitos.»

«Hace pocas semanas, en dos ocasiones distintas y en ciertas islas del East River, se han realizado con éxito pruebas de ensayo de un procedimiento nuevo para llevar a tierra un cabo de salvamento desde un buque en peligro. Las maniobras no se produjeron desde ningún barco siniestrado, tal como en la ilustración representa el artista, sino que la cometa se empleó para arrastrar la boya, a la que estaba sujeto el cabo, a través de una franja de cinco octavos de milla de anchura, por la que discurría una corriente a una velocidad de dos millas y media por hora.»

Economía de mercado en Polonia

¿Cómo debe transformarse una economía antaño centralizada? La experiencia polaca ofrece hasta ahora buenas lecciones a otros países de Europa oriental y constituye un reto para Occidente

Jeffrey Sachs

Durante los últimos dos años, las naciones de la Europa del Este han venido abandonando un sistema económico que se basaba en la propiedad estatal de los bienes y los medios y en el control centralizado de la producción y de los precios. Con esa renuncia, esperan construir economías de mercado libre, las que trajeron la prosperidad a Europa occidental durante el período postbélico. ¿Cómo ha de desarrollarse semejante transformación?

Posibilitaron el cambio las revoluciones democratizadoras que pusieron fin al control comunista en la Europa socialista, pero el cambiar de dirección en la economía refleja algo más que las evoluciones de la política. Hacia 1989 los pésimos incentivos del sistema comunista habían llevado las cosas al borde mismo del colapso económico. La burocracia estatal mantenía más allá de todo límite sensato la expansión de una obsoleta industria pesada, descuidando a la vez la debida provisión de bienes de consumo y de servicios. El afán de incrementar a toda costa la producción industrial había traído consigo una degradación del ambiente mucho mayor que la que en Occidente levantó las protestas del movimiento ecologista. Por término medio, el checo, el polaco o el húngaro disfruta —aunque no es ésta precisamente la palabra más propia— de un nivel de vida muy inferior al que tienen hasta los países más pobres de la Comunidad Europea y aproximadamente igual que el de algunas naciones de Iberoamérica que se hallan en vías de desarrollo.

JEFFREY SACHS, consejero económico de varios gobiernos de Hispanoamérica y de Europa oriental, colaboró en el programa de reforma de Polonia. Entre 1986 y 1990 contribuyó a diseñar y poner en práctica un plan de estabilización para Bolivia, que redujo la inflación anual del 40.000 por ciento al 15 por ciento. Dirige un equipo de economistas que asesora al presidente ruso Boris Yeltsin. Se formó en la Universidad de Harvard, donde ocupa ahora la cátedra Galen L. Stone de comercio internacional.

Aunque los ciudadanos ansían los beneficios de una economía de mercado, los líderes nacionales han de enfrentarse aún a grandes obstáculos en la realización de las reformas. Por ejemplo, las elecciones parlamentarias celebradas en Polonia el pasado otoño muestran hasta dónde puede llegar la paciencia de la gente en cuanto al desempleo y el escaso poder adquisitivo de los sueldos durante el período de transición económica. (A los arquitectos del milagro económico de la Alemania de posguerra y de otras reestructuraciones, también se les criticó mucho los primeros años por el trastorno que supuestamente estaban causando.) Además, el número ingente de empresas que eran de exclusiva propiedad estatal plantea una problemática sin precedentes a la hora de devolverlas a manos privadas.

La ayuda de Occidente será esencial para esta reestructuración. No sólo se requieren vastos recursos para reconvertir industrias anticuadas y restaurar ciudades ruinosas; Occidente ha de hacer comprender que, una vez establecidas de nuevo las economías libres, serán bien acogidas en el seno de la comunidad mercantil europea y mundial. De no proceder así, podría verse amenazada la salud económica de la Europa socialista y su naciente democracia.

Me ha tocado intervenir en la reestructuración de Polonia. Según se reconoce ampliamente, su economía es una de las más desastrosas de Europa oriental. El sector de la industria pesada es un dinosaurio derrochador que necesita la protección del estado frente a la competencia internacional. Estaban descuidados la industria ligera, los servicios y la distribución, amén del sistema financiero de la nación. El núcleo principal del sector agrícola lo forman millones de campesinos pobres que roturan parcelas de tierra muy pequeñas, por lo general inferiores a las cinco hectáreas.

Para remediar esa situación, el país se esfuerza en sustituir el sistema socialista por un sistema político y económico semejante al de los miembros de la Comunidad Europea. Su meta fundamental, compartida por los demás países del antaño bloque soviético, es la más estrecha integración posible a la Europa de Occidente. Para el cambio de siglo esta carrera deberá llevarle a pertenecer, en calidad de miembro de pleno derecho, a la Comunidad Europea. No existe ninguna tercera vía: mezcla de una continuada propiedad estatalista con las fuerzas del mercado, mixtura que algunos han propugnado como un compromiso entre el viejo socialismo y el moderno capitalismo.

El anterior ministro de Hacienda Leszek Balcerowicz lo dijo sin rodeos: “Polonia es demasiado pobre para andarse con experimentos. Lo que tenemos que hacer, por tanto, es imitar modelos que funcionan. Dejemos a los países ricos que experimenten, si quieren.”

El afán de armonizar con la Comunidad Europea y de unirse luego a ella está hondamente enraizado. Polonia desea volver a su puesto en la corriente principal de la sociedad y la cultura europeas. Al fin y al cabo, el lema de los movimientos revolucionarios de 1989 fue “volvamos a Europa”. Añádese que los polacos se muestran unánimes en su admiración por los logros sociales y políticos de la Europa Occidental de la posguerra, donde se ha sabido crear tanta riqueza y establecer una sociedad más justa merced a la propiedad privada, fomento sistemático

del bienestar social y sólidas democracias parlamentarias.

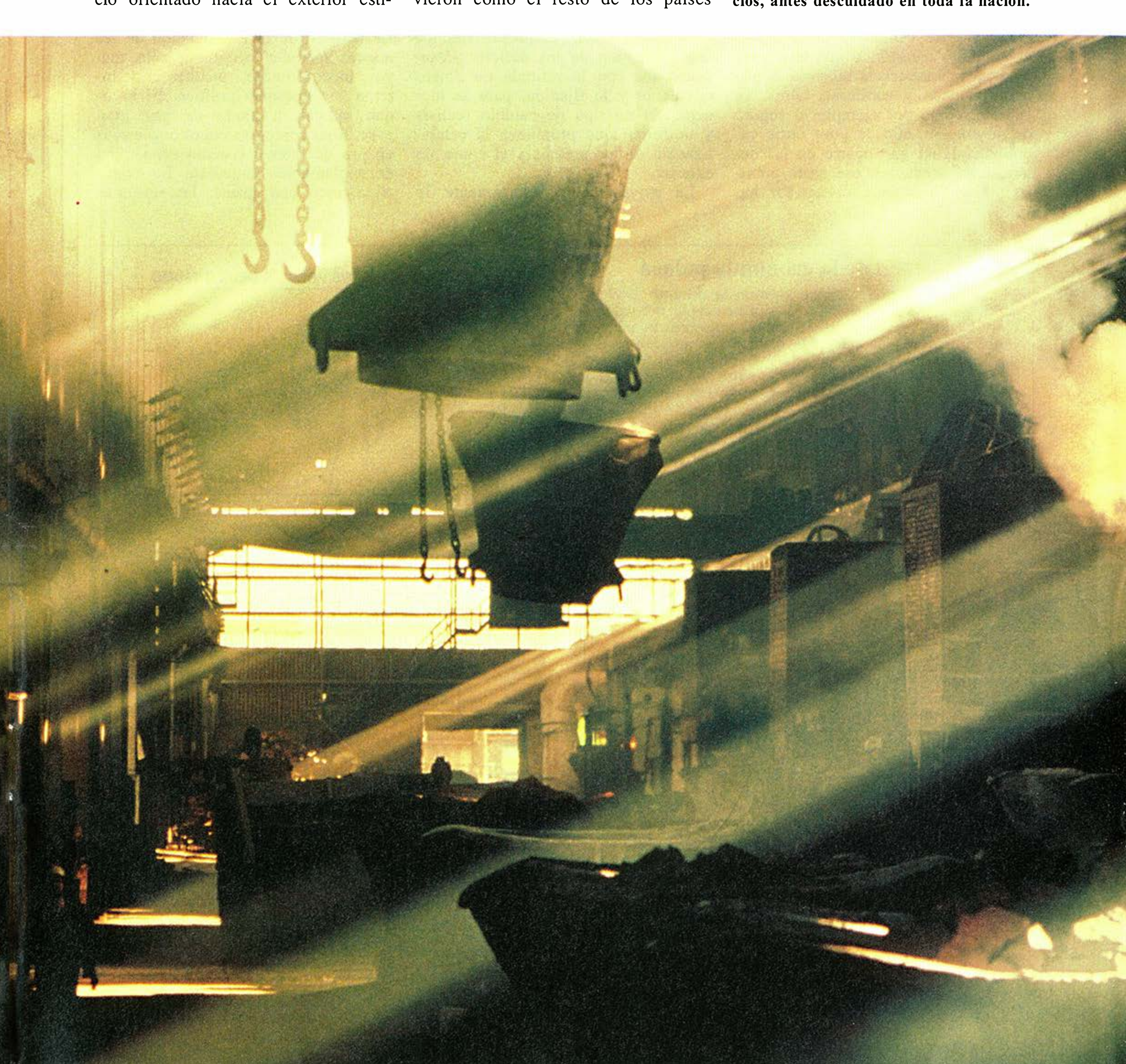
Los polacos no sólo consideran a las naciones de la Comunidad Europea un modelo estimulante, sino que están también convencidos de que la libertad de comercio y de relaciones financieras con la Comunidad les ayudará a alcanzar en seguida los niveles de vida occidentales. Hay señales evidentes de que la vinculación con la Comunidad Europea ha ayudado a países más pobres (Portugal y España) a aminorar la distancia que en cuanto a nivel de vida había entre ellos y naciones ricas como Alemania y Francia. En líneas más generales, los datos económicos evidencian que los regímenes de comercio orientado hacia el exterior estimulan el crecimiento, y la Europa occidental es para sus vecinos del Este el más lógico socio mercantil.

Otra ventaja del compromiso adquirido por integrarse en la Comunidad Europea tiene carácter simbólico. Muchos inversores potenciales temen que el vendaval económico de la reestructuración pueda llevar a domésticas demandas políticas de proteccionismo o a otras acciones contrarias al crecimiento a largo plazo. Los convenios y tratados que se firmaran en la Comunidad Europea pondrían irrevocablemente a Polonia en curso de libre comercio y harían más atractiva allí la inversión.

Tras su incorporación en la Comunidad en 1986, España y Portugal vieron cómo el resto de los países incrementaba su inversión en ambos, lo que en parte al menos se debió a que sus políticas a largo plazo estaban ya más aseguradas.

En la transformación económica de Polonia hay dos componentes críticos. El primero concierne a las reformas necesarias para la conversión de una economía sometida a una dirección autoritaria en otra que se oriente por el mercado; el segundo

1. UNA INDUSTRIA PESADA ENVEJECIDA: tal es el talón de Aquiles de la economía de Polonia. Las recién liberadas fuerzas de mercado recortan por momentos la producción de ese sector. Crece, en cambio, el empleo en el sector de servicios, antes descuidado en toda la nación.



es el de la real reestructuración de las actividades industriales y de los negocios, que tendrá lugar a resultas de las reformas. Las reformas pueden y deben acometerse sin dilación: en un plazo de tres a cinco años a lo sumo. La reestructuración, por contra, durará forzosamente una década o más, según los inversores vayan creando nuevos sectores de la economía en respuesta a las señales de mercado resultantes.

Mientras se desarrolle la reestructuración, el gobierno deberá montar una firme red protectora que salvaguarde a los miembros más vulnerables de la sociedad: campesinos, pensionistas y obreros de industrias anticuadas. Esa red de protección está tejida, en buena parte, con medidas que se venían tomando desde el gobierno anterior, y que hacen referencia a la asistencia sanitaria, ayuda a la vivienda y similares. Otras, en cambio, como por ejemplo el seguro de desempleo, son de puro corte capitalista. Igual que ocurre en las democracias asentadas, ese gasto público puede fácilmente rebasar los haberes presupuestarios. El mantenimiento del debido equilibrio entre las necesidades sociales y las posibilidades presupuestarias constituye una clave de la economía y un reto político que no tiene a la vista fácil solución.

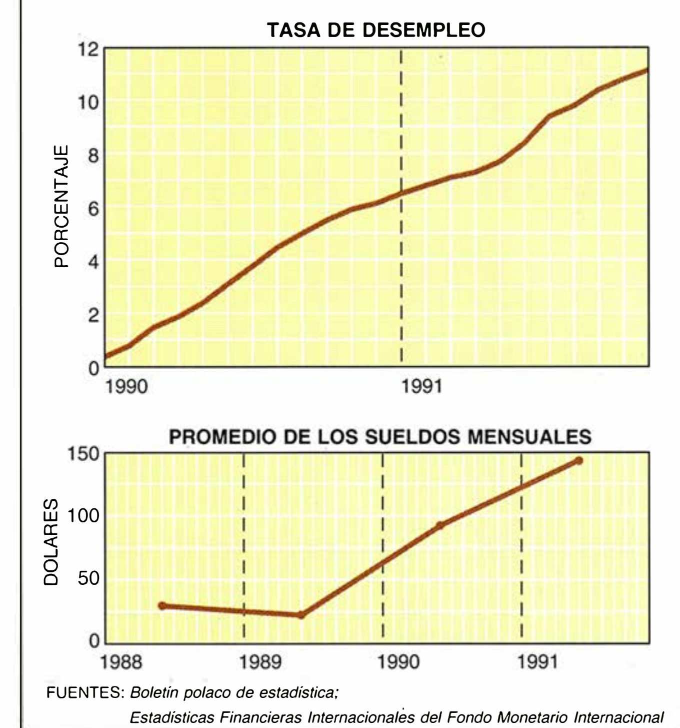
Aunque el gobierno polaco sufre presiones para cambiar los planes que generan paro y otros trastornos sociales, sigue adelante con las reformas. Tres tipos principales de medidas se destacan en el panorama político: liberalización, estabilización y privatización. La liberalización económica significa introducir la competencia en el mercado y crear una estructura legal para la propiedad privada y para los negocios entre particulares. La estabilización fomenta un clima en el que pueden sobrevivir toda clase de empresas. Implica una limitación de los déficits presupuestarios con la retirada de dinero circulante y la fijación, para la moneda, de un tipo de cambio realista y uniforme que promueva la estabilización de los precios y el comercio exterior.

La privatización, ciertamente lo más complicado de la reforma, consiste en transferir la actual propiedad estatal (fábricas, por ejemplo) al sector privado. Bajo el régimen comunista, 3000 empresas industriales detentadas por el gobierno representaban el 90 por ciento de la producción fabril. Otras 5000 empresas estatales operaban en los ámbitos del transporte, las comunicaciones y el comercio. Además de la privatización de las empresas estatales, la formación de otras enteramente nuevas, hecha posible por la liberalización económica, contribuirá también a privatizar la economía.

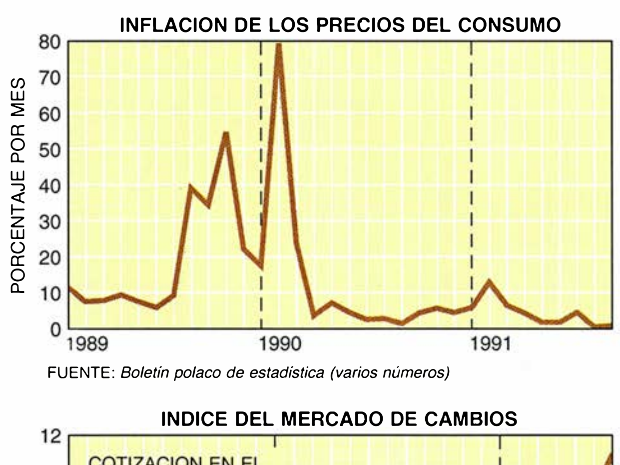
En el avance de la economía hacia el capitalismo de mercado, las reformas, amplias y rápidas, pueden ayudar a disipar la confusión del público respecto a las "reglas del juego". La lentitud de la introducción de las nuevas medidas originaría sólo mayor incertidumbre, incoherencia interna y resistencia política. El enfoque radical, a modo de una gran explosión, comporta claros incentivos en pro del nuevo sistema económico de implantación inmediata. Lo expresó alguien con guasa: las reformas

Estado de la economía polaca

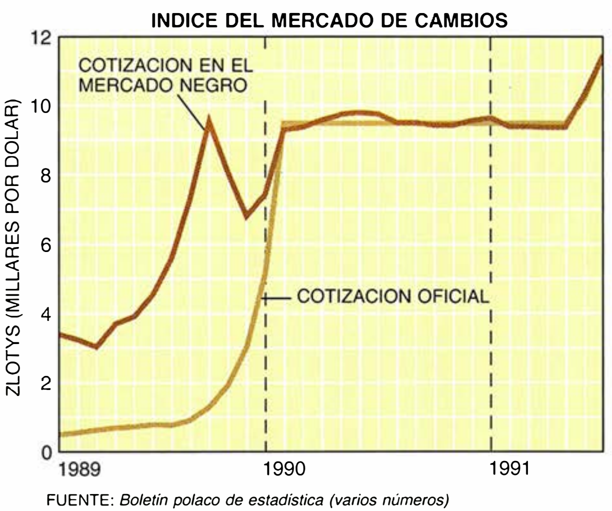
El hundimiento del régimen comunista durante 1989 produjo una fuerte inflación y una drástica caída del valor del zloty (*derecha*), efectos ambos que se consiguió frenar y detener mediante las reformas económicas implantadas en enero de 1990. Desde entonces, el desempleo (que antes era ilegal) ha aumentado rápidamente, lo mismo que los sueldos de los que aún siguen estando empleados.



FUENTES: *Boletín polaco de estadística; Estadísticas Financieras Internacionales del Fondo Monetario Internacional*



FUENTE: *Boletín polaco de estadística (varios números)*



FUENTE: *Boletín polaco de estadística (varios números)*

graduales recuerdan las ideas de aquel que quiso adaptar el sistema británico de conducción al continental sin alterar el lugar del volante.

Siguiendo una estrategia ahora más o menos fielmente emulada por otras naciones del Este de Europa, Polonia implantó con la mayor rapidez posible los tres principales pilares de la reforma. El primero de enero de 1990 puso en circulación una moneda convertible e introdujo otros sustanciales elementos de liberalización y estabilización. Ha iniciado ya el proceso de la privatización, que reviste mayor complejidad.

Con anterioridad a la repentina apertura de comienzos de 1990, muchos economistas y otros entendidos habían manifestado interés por que se liberalizasen los precios mientras el grueso de la producción industrial estaba aún en poder de unos pocos monopolios de propiedad estatal. Algunos insistían en que los precios deberían mantenerse controlados hasta que se asentaran empresas competitivas. Afortunadamente, se equivocaron: el comercio libre y la resultante disponibilidad de bienes de fuera a precios razonables demostraron ser una vía mucho más rápida y eficaz hacia la competitividad de los precios en los mercados polacos que la que cualquier intento de desmonopolización administrativa podría haber ofrecido.



2. LA AGRICULTURA POLACA es aún poco productiva y requiere un trabajo intensivo. La mayoría de los labradores cultivan parcelas de no más de cinco hectáreas de extensión. Se espera que los drásticos recortes de los subsidios promuevan la concentración parcelaria para sacarles mayor rendimiento a las fincas.

No tardó en conseguir la estabilización macroeconómica eliminando su déficit presupuestario y poniendo en práctica una severa política monetaria. La quiebra total en que acabó el antiguo régimen trajo consigo una extraordinaria inestabilidad financiera y un breve período de hiperinflación, pero, como parte integrante de la "gran explosión", o terapia de choque, el gobierno recortó subsidios que habían llegado a sumar más del 5 por ciento del producto nacional bruto, subió los impuestos, controló los sueldos y devaluó considerablemente la moneda. Con todo ello, el presupuesto pasó, de un déficit del 7,4 por ciento del producto nacional bruto en 1989, a un superávit del 3,8 por ciento en 1990.

Estas medidas, junto con la eliminación de la mayoría de los controles de precios, hicieron que el nivel de los precios para los consumidores se doblara en enero de 1990. Pero, no mucho después de este salto, repentino y aislado, de los precios, el nuevo clima económico supuso el fin de la fuerte inflación y, lo que todavía es más digno de nota, que se acabaron rápidamente la crónica escasez y unas limitaciones que habían durado décadas.

En 1990 se crearon centenares de miles de pequeños negocios, tejiéndose, en cuestión de meses, una red de tiendas, establecimientos de servicios y firmas dedicadas al comercio internacional, a la construcción y al transporte. El desarrollo de los sectores de servicios y del comercio resultó espectacular en una economía que había estado tanto tiempo privada de ellos. Durante los primeros pocos meses, el capital de arranque provenía de fuentes no oficiales más bien que del sector bancario oficial. La gente del país invertía monedas fuertes (en comparación con los zlotys) que habían guardado bajo el régimen socialista. Vecinos y familiares de los empresarios contribuían con dinero, como lo hacían también parientes que vivían en Occidente. Además se obtenía capital arrancándoselo por procedimientos formales o informales a las empresas del Estado: por ejemplo, los municipios arrendaron decenas de miles de locales comerciales a sus trabajadores. Muchas operaciones se iniciaban informalmente (por ejemplo, vendiendo artículos alimenticios desde la trasera de un camión) y en seguida se desarrollaban hasta convertirse en pequeñas tiendas y negocios con todas las de la ley. Hacia finales de 1990 y durante 1991 el sector bancario formal empezó a proporcionar cada vez más créditos a las pequeñas empresas que iban sumándose al sector privado.

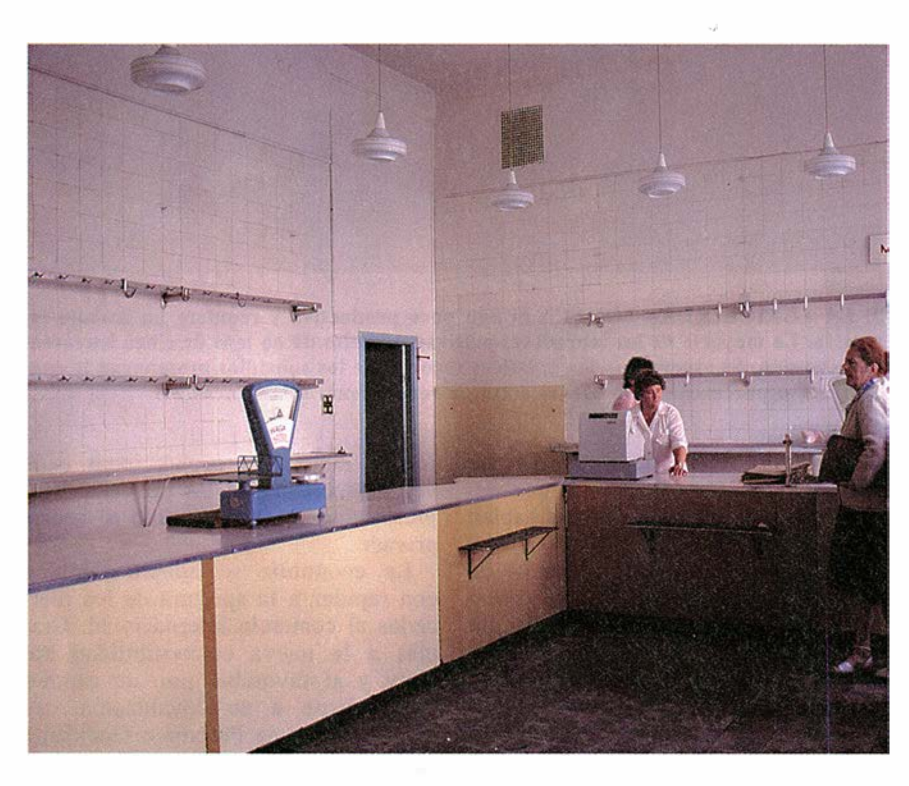
La economía se adaptó también con rapidez a la apertura de los mercados al comercio internacional. Gracias a la nueva convertibilidad del zloty y al favorable tipo de cambio subsiguiente a su devaluación, las exportaciones de Polonia a Occidente subieron, de los 8500 millones de dólares en 1989, a los 11.500 millones de 1990. Este aumento continuó en 1991 y ha ayudado a pagar el fuerte auge de las importaciones. El 'boom' de éstas refleja un enorme deseo de adquirir productos no perecederos de Occidente que antes resultaban inasequibles, así como un importante aumento de maquinaria importada y también de energía para compensar la pérdida de los suministros que procedían de la Unión Soviética.

Aunque los esfuerzos por liberalizar y estabilizar la economía polaca han alcanzado en gran parte estos objetivos, la privatización, especialmente la de las empresas mayores, se está retrasando peligrosamente. Este es el problema clave de la nación; de no resolverse, cabe el riesgo de tornar a una gravísima inestabilidad económica.

La privatización de empresas pequeñas (con menos de quinientos empleados) se ha ido llevando adelante con rapidez. El transporte por

carretera, la construcción y las plantas industriales menores han pasado ya, en buena parte, a manos privadas, habiendo sido la mayoría subastadas en público o vendidas a sus propios empleados. A mediados de 1991 habían sido vendidos o alquilados a particulares más de 40.000 locales de negocio; combinándose esto con el auge de las compañías privadas en el sector de los servicios, resulta que ha llegado a privatizarse del 80 al 90 por ciento del comercio al por menor.

Lo que contrasta con el caso de las grandes empresas fabriles, privatizadas en una pequeña fracción. La ingente magnitud de la tarea es algo que sobrecoge el ánimo. En la Inglaterra de los años ochenta, por ejemplo, bajo la agresiva campaña pro-privatización acometida por el gobierno Thatcher, sólo se consiguió privatizar cada año unas cinco empresas estatales. Aun a este ritmo —que en el Reino Unido podía contar con un avanzado mercado de capitales y con un sector privado capaz de absorber las empresas de propiedad estatal—, los polacos tardarían siglos en desestatalizar el sector. Sin tradición en el libre mercado, es difícil evaluar con tino las empresas poseídas por el Estado, y, sin una gran masa de capital privado, pocos pueden comprar a los precios aceptables. Aunque los inversores extranjeros tuviesen suficientes recursos para engullirse las empresas polacas (suponiendo que quisieran hacerlo), tal proceder sería políticamente inadmisible.





3. LIBERALIZACION DE LA ECONOMIA y disponibilidad de bienes de consumo (aunque a precios más altos). En la fotografía superior vemos hasta qué punto podía estar mal surtida una carnicería cuando aún se hallaba en vigor el control de los precios; en la de abajo, en 1990, después de haberse subido éstos mucho.

Ante semejantes dificultades, el pasado verano se tomó la decisión de privatizar varios cientos de grandes empresas industriales mediante el reparto de acciones entre todos los polacos. El denominado Plan de Privatización General trata de distribuir acciones entre varios fondos de inversión privados, cada uno de los cuales tendrá en su cartera un conjunto variopinto de empresas. A su vez, las acciones de los fondos de inversión se distribuirán, libres de cargos, a los ciudadanos adultos. Se reclutarán gestores extranjeros que ayuden a supervisar los fondos de inversión, si bien los titulares de éstos habrán de ser ciudadanos polacos. Al mismo tiempo, una fracción de las acciones de cada empresa, alrededor del 10 por ciento, se repartirá sin carga alguna entre sus obreros y directivos.

Una vez estén ya las acciones en manos privadas, prosigue el plan, se desarrollará un mercado de valores para las mismas. Obreros y directivos podrán vender sus acciones a otros inversores, y los fondos de inversión podrán también intercambiarse entre sí las acciones o vendérselas a otros inversores, sean éstos nacionales o extranjeros. Los titulares podrán negociar con sus participaciones en los fondos de inversión, haciendo así que la presión del mercado obligue a éstos a administrar prudentemente sus carteras. Entre tanto, los fondos de inversión nombrarán a algunos de sus miembros para que formen parte del consejo de administración de cada una de sus empresas. Los miembros de ese equipo ejercerán un control de la gestión, como se hace en Occidente.

Los gerentes de las empresas estarán, pues, sometidos a varios tipos de control y contarán con incentivos que no existen para las compañías de

titularidad estatal. Además de estar motivados por su propia participación en los beneficios, esos gerentes deberán responder ante el consejo de administración, muchos de cuyos integrantes habrán sido nombrados por los fondos de inversión. Se enfrentarán también a la prueba de ver cambiar de precio a sus acciones en el mercado de valores. Las acciones de las empresas sin futuro irán a la baja, forzando a la venta de la entidad o por lo menos a cambiar sus directrices. En cambio, el valor de las empresas rentables irá en alza, lo que dejará capital disponible para invertir. Además, una vez estén las empresas en manos privadas, se reducirán las consecuencias políticas de la reestructuración, pues el trabajo lo hará el sector privado en vez del gobierno. Y también será más fácil resistirse a la demanda de subsidios y de protección.

El plan aquí esbozado estaba a punto de ponerse en práctica a finales de 1991, aunque los complejos resultados de las elecciones parlamentarias hacían incierto su futuro. Al menos se establecerán algunos fondos, pero el método de distribución de sus acciones entre los naturales del país sigue siendo tema de debate. Y está igualmente en cuestión el número de empresas que participarán por ahora en el programa. Se han escogido de entrada unas 200, con la mente puesta en ampliar a otras empresas las participaciones si el programa alcanza el fruto esperado.

Mientras tanto, la gran industria estatal de Polonia camina hacia el abismo. Bajo el régimen socialista, los gerentes de las empresas respondían ante el estado o el partido único y las medidas que tomaban se respaldaban con la amenaza de la violencia estatal. En Occidente, y bajo los planes de privatización general, los gerentes rinden cuentas al consejo de administración, obligado por la ley a actuar en nombre y a favor de los accionistas. (Aunque no siempre se cumpla con ese mandato, por lo menos las responsabilidades legales básicas y los incentivos económicos están en su sitio.)

Tal como andan ahora las cosas en Polonia, la mayoría de los gerentes no responden ni ante el consejo de administración ni ante el titular público, el Tesoro. Obran por su propia cuenta o sujetos al control de un consejo de trabajadores. Sólo en una pequeña minoría de casos hay una junta supervisora nombrada por el gobierno para que represente los intereses del Tesoro como propietario legal de las empresas, medida ésta a la que se llama comercialización.

El resultado de todo ello es que los gerentes tienden a gastar los beneficios de la empresa en sueldos elevados, con lo que hacen que las plantas industriales resulten menos competitivas de lo que ya eran. La política de control salarial depende de directivas centralizadas e impopulares, tan ineficaces en el aspecto económico cuan debilitadoras en el político.

Por añadidura, los informes indican que abunda la gestión ordenada al propio lucro, con rencillas y conflictos de intereses entre los gestores de empresas públicas. Se les ha acusado a muchos de provocar la situación de quiebra, para así comprar ellos a precios tirados la misma empresa, o de formar compañías privadas que luego reciben contratos preferentes con las empresas estatales por ellos dirigidas. Han aceptado fusiones y ofertas de compra, arriesgadas y desventajosas, porque eso les proporcionaba beneficios personales, mientras que rechazaban ofertas mejores que pudieran poner en peligro su cargo directivo. En resumen: todos los males del más desenfrenado capitalismo y del absoluto *laissez-faire*, que fueron la plaga de Occidente en el siglo XIX, se abaten en la actualidad sobre Polonia.

Existen también las empresas "zombis", cuyos gestores, incompetentes, no supieron adaptarlas a las nuevas condiciones del mercado. Muchas empresas, como si el colapso del mercado soviético las hubiese dejado taradas, prosiguieron en su ritmo de fabricación y almacenando stock en espera de un milagro. A mediados de 1991 se acabó el dinero y cayó sobre el país una avalancha de agobiadoras insolvencias.

En tanto se demore la privatización de las grandes empresas, se hace imperativo un uso más amplio de la comercialización. Aunque el nombrar a un consejo de administración que vigile los intereses del Tesoro no equivale a establecer la propiedad privada, introduce, por lo menos, cierto control de la gestión de los directores de empresa y somete ésta a las reglas normales de los usos empresariales.

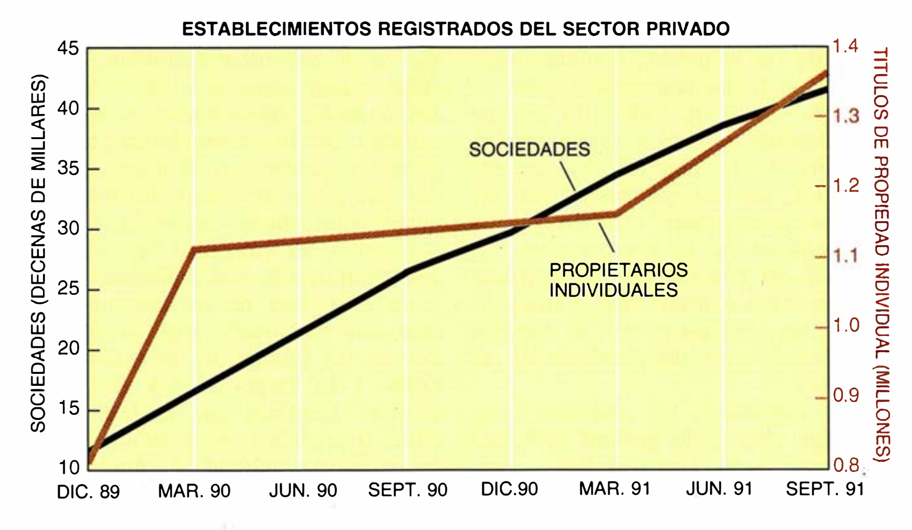
Pero incluso tal medida está siendo aplicada sólo con lentitud. Algunos dirigentes políticos infravaloran la importancia de establecer una clara estructura legal para las empresas estatales, mientras que otros indican la real (pero superable) dificultad logística de encontrar individuos cualificados para sentarse a las mesas de los comités supervisores. A algunos críticos de la comercialización les preocupa mucho que el abuso de poder por parte de esas comisiones de supervisión pueda, de hecho, volver a poner a las empresas bajo el control centralizado del gobierno.

La estructura de la economía polaca está cambiando bajo la influencia de las fuerzas de mercado liberadas a lo largo de los dos años últimos. Cambios que acelerarán su ritmo a medida que se avance en la privatización general y otras reformas. Sin olvidar la presión de la competencia internacional, que habrá de desempeñar el papel de motor de la reestructuración.

Aunque es imposible predecir con exactitud los resultados a largo plazo —qué sectores de la industria florecerán y qué otros decaerán—, apuntan algunas tendencias básicas. El sector industrial en conjunto va a menos, mientras que los sectores de servicios, hasta hoy descuidados (señaladamente las tiendas, los restaurantes, la banca y los de prestación personal como fontaneros y mecánicos) están en auge. El estereotipo de una Polonia en profunda recesión sólo es exacto para su sector industrial. El área de los servicios conoce momentos prósperos y boyantes. Entre diciembre de 1989 y junio de 1991 se iniciaron 460.000 negocios, la mayoría en el sector de los servicios, y las nóminas de todas las compañías privadas pequeñas aumentaron en una cuantía de 860.000 trabajadores.

Cambios importantes se están operando también en la agricultura. Polonia nunca completó el gran traspaso demográfico de la agricultura a la industria y los servicios, que se produjo en casi todos los países industrialmente avanzados. Su agricultura representa todavía alrededor del 20 por ciento del total de empleo y el 10 por ciento del producto nacional bruto. Muchos campesinos se ven en apuros financieros con los drásticos recortes de los subsidios a la agricultura polaca que han tenido lugar durante los dos últimos años. De aquí a 10 o 20 años, los minifundios tendrán que unirse para elevar su rendimiento.

Pero lo más importante a largo plazo es llevar a cabo una completa reestructuración en lo que queda del sector industrial, prescindiendo de industrias pesadas que consumen mu-



4. AUGE EXPLOSIVO de la empresa privada, dominio al que han ido a parar segmentos importantes de la economía polaca. Las grandes empresas siguen estando en poder del Estado.

cha energía, tales como las acerías y los astilleros, y orientándose hacia otras industrias que con técnicas de vanguardia obtengan mejores rendimientos del trabajo para competir en los mercados internacionales. Polonia ofrece a bajo coste mano de obra cualificada, en particular técnicos, que pueden convertirla en lugar atrayente para la producción de bienes de alto valor añadido que sean exportables a la Europa occidental. Está ya en curso alguna reestructuración importante: el número de asociaciones industriales privadas aumentó en cerca de 25.000 entre diciembre de 1989 y junio de 1991.

Es muy probable que las empresas occidentales instalen en Polonia fases de la producción destinada a la exportación, a imagen de lo que ocurre ahora con la inversión europea en España, estadounidense en México y japonesa en Corea, Taiwan y el resto del sudeste asiático. Sin embargo, hasta la fecha los temores respecto a la poca claridad de los derechos de propiedad y a la viabilidad política de las reformas económicas polacas han mantenido a un bajo nivel la inversión extranjera directa. Si las reformas se asentaran, la inversión aumentaría mucho en los próximos años.

A pesar de los logros conseguidos hasta hoy, la situación de Polonia sigue siendo frágil. A la generalidad de la ciudadanía el hecho de que la continua aparición de nuevas firmas preanuncie un gran auge de la economía parece impresionarle menos que la velocidad a la que las empresas fabriles desembocan en la bancarrota. Aunque la gente agradece que se haya puesto fin a la escasez y a las colas, se las ve y se las desea para pagar con sus bajas ganancias mensuales los elevados precios del mercado. Muchos andan confusos, porque no entienden por qué, al haber terminado el comunismo, no ha llegado la prosperidad, por qué tienen ahora a la vez mercado libre y bajo nivel de vida y por qué el resultado más notorio de la reforma económica es el desempleo. En una encuesta del pasado verano, alrededor del 60 por ciento de los polacos dijo que temían perder sus empleos de un momento a otro.

Segmentos importantes de la población han sido perjudicados por las reformas de estos dos primeros años. Los cientos de miles de campesinos que cultivaban parcelas pequeñas y poco productivas han dejado de percibir los subsidios que les ayudaban a mantenerse a flote. Semejantemente, cientos de industrias que dan empleo a cientos de miles de obreros son incapaces de competir bajo las nuevas condiciones de mercado. La tasa de desempleo había subido a cerca del 11 por ciento a finales de 1991.

No todo el aumento del desempleo se debe a las reformas. Siempre hubo parados, pero su número no lo registraba un régimen que consideraba el desempleo un crimen más que una desgracia que mereciese compensación. Muchos economistas sospechan también que una buena proporción de desempleados trabaja en la economía sumergida. Por otra parte, el colapso de la economía soviética y la interrupción de las relaciones comerciales con la Unión Soviética (ahora Comunidad de Estados Independientes) han llevado a una rápida disminución de las importaciones procedentes del bloque socialista. Centenares de empresas, en Polonia y en otros países, se han visto obligadas a cerrar sus puertas del todo o a reducir muchísimo su producción. En la medida en que las empresas pueden cambiar del Este al Oeste la dirección de sus exportaciones, las reformas tal vez ayuden de hecho a Polonia a aliviarse y recuperarse de esos golpes externos. Sin embargo, es una realidad que el paro está aumentando mucho, y los temores de desempleo tienen un motivo indiscutible.

Aunque los polacos maldicen las reformas por la presunta caída en picado de su nivel de vida, seguramente exageran a este respecto. El promedio de los sueldos ha subido menos que los precios desde que se iniciaron las reformas, lo cual ha reducido el poder adquisitivo de los ingresos netos de cada familia. Pero, en líneas generales, los bienes nunca pudieron realmente adquirirse a los precios anteriores a la reforma, al menos no sin que para comprarlos hubiese que hacer largas colas o andarse con mil trampas y sobornos, pagando cantidades extraordinarias en el mercado negro. Según los datos de las encuestas, por término medio los polacos consumen hoy en día algo más de carne, de frutas y de artículos duraderos que lo que consumían antes, lo cual parece indicar que la mayor disponibilidad de los bienes compensa con creces sus mayores precios. Añádase que la gente se está ahorrando los millones de horas por semana que antes se tenía que pasar de plantón en las colas.

Con todo, es verdad que el promedio de algunos surtidos parece que está en recesión. Un área importante de reducción del consumo es la del vestido. Determinados grupos sociales, tales como los obreros de las fábricas y los del campo, han sido muy perjudicados por las reformas. Y al colapsarse el comercio soviético con Polonia en 1991 y acabarse las ventas subsidiadas del petróleo soviético, la sociedad sufrió una grave pérdida de rentas, aunque no a resultas de las reformas económicas propiamente dichas.

En el revuelto ambiente actual es incierto el sino de las medidas reestructuradoras. En la Alemania de la posguerra, pongamos por caso, Ludwig Erhard, recordado ahora como el padre del milagro alemán, fue acremente acusado de estar creando más

paro que altos niveles de vida. La prosperidad llegó sólo varios años después del comienzo de sus reformas. El gobierno Adenauer, del que Erhard era miembro, a duras penas logró sobrevivir aquellos primeros años difíciles, y si lo consiguió fue en gran parte gracias al aluvión de dinero que entró en Alemania con el Plan Marshall.

En Polonia sólo podrá recordarse a Balcerowicz como padre del milagro económico de su país si a sus reformas se les da el tiempo necesario para que funcionen. Y el tiempo puede escasear, dado que es limitada la paciencia de la población y que hay poderosas fuerzas políticas que propugnan el proteccionismo y el mantenimiento subsidiado de la industria deficitaria.

El peligro más grave en Polonia es que la inquietud populista en torno a las estrecheces a corto plazo, la confusión acerca de los derechos de propiedad y un desmenuzamiento de las fuerzas políticas en el Parlamento lleven a que haya un gobierno débil incapaz de tomar las últimas medidas decisivas para el establecimiento de la propiedad privada. En ese caso, la situación económica es muy probable que se deteriore aún más y que, como ha sucedido en Iberoamérica, el gobierno democrático quede tan desacreditado como el socialismo totalitario predecesor.

Entre la implantación de una reforma y la subsiguiente prosperidad se extiende un largo "valle de lágrimas", según se ha observado en casi todos los países que han experimentado una transformación económica radical, desde la Alemania y el Japón de la posguerra hasta el Chile y el México de los años ochenta. El que se logre atravesar rápidamente ese valle depende del liderazgo político y de que la sociedad esté de acuerdo en mantener un conjunto estable de medidas. Si se cae en la contradicción o en la vacilación, es fácil que se pierda todo... como ha ocurrido en Argentina, que ha estado 45 años dando tumbos.

Las peculiares tradiciones electorales y divisiones sociales aumentan el peligro de que el país "se extravíe por el desierto". Polonia organizó sus elecciones parlamentarias en octubre de 1991 siguiendo un sistema de casi estricta proporcionalidad que da representación hasta a los menores grupos que consigan una pequeña fracción del total de votos. La ley electoral amplió las divisiones que ya existían entre el campesinado y los obreros industriales, los simpatizantes con la Iglesia y los anticlericales, los votantes urbanos y los rurales, y otras muchas por el estilo; el resultado fue que los polacos eligieron representantes pertenecientes a no menos de 29 partidos y que ningún partido obtuvo más del 15 por ciento de los votos. La única salida, el gobierno de amplia coalición, tiene contra sí la historia: semejantes ejecutivos los paralizan con facilidad las contiendas intestinas.

Y aun cuando los polacos puedan forjar un sólido consenso interno, esto no será suficiente para que tengan éxito las nuevas medidas económicas. Por muy atractiva que sea la esperanza de que Polonia y otras naciones del Este de Europa logren volver a ponerse en pie por sí mismas, no pasa de ser mera ilusión, sin ningún realismo. A Occidente le toca desempeñar un papel de crucial importancia. Los hasta hace poco satélites soviéticos se hallan en la cruel necesidad de ayuda financiera inmediata para poderse reestructurar ahora y durante unos cuantos años. Los EE.UU. y la Europa occidental deben contribuir a asegurar que en esos países se disponga de recursos suficientes para la modernización de las fábricas, las carreteras y otros servicios públicos durante este delicado período.

Pero quizá sea tan importante como la asistencia financiera y técnica el papel simbólico que desempeña Occidente. El del "retorno a Europa" es el lema que hasta ahora ha servido de principal aglutinante para lograr el consenso de todas las fuerzas sociales respecto a la reforma. Como la Europa occidental no muestre interés por este retorno de Polonia (o del resto de la Europa socialista), entonces las intensas presiones que ya se le están oponiendo a la reciente democracia podrían acabar con la reforma y la reestructuración en curso. Peor aún, la reticente y mezquina actitud que hasta la fecha viene mostrando Occidente y los indudables casos de rapacidad por parte de los inversores occidentales que sólo procuran su propio beneficio, podrían desencadenar una reacción de xenofobia que acaso esté ya tomando forma.

Para ayudar a la reestructuración, la Comunidad Europea debería darle a Polonia indicios de su voluntad integradora. Debería decirle con absoluta claridad que, una vez haya superado los graves impedimentos que dificultan su reforma económica, puede confiar en ser admitida como miembro de pleno derecho en la Comunidad Europea. Ninguna otra cosa canalizaría más eficientemente las energías y las pasiones políticas hacia la realización de la reforma.

La firma de convenios de asociación entre la Comunidad Europea y Checoslovaquia, Hungría y Polonia a finales de 1991 supuso un paso importante en esta dirección. Tales convenios prevén la libertad de comercio entre los tres países y la Comunidad Europea, en lo tocante a productos industriales, hacia el final de esta década. Por desgracia, los acuerdos no fueron todo lo amplios que hacía falta, lo mismo en vínculos jurídicos que en intercambios agrícolas. La Comunidad Europea hizo algunas concesiones, pero su estructura proteccionista permanece intacta. Se trasluce con claridad que los occidentales sienten todavía profundas angustias y aprensiones cuando se trata de estrechar vínculos con el Este, y estos recelos podrían originar considerables trastornos políticos.

Europa se halla actualmente en un punto crucial de su historia. La guerra fría entre la democracia y el socialismo totalitario, que tuvo dividido al continente durante medio siglo, queda ya atrás. El totalitarismo la ha perdido. Pero, a menos que todos los europeos trabajen juntos para ayudar a construir economías de mercado en las naciones del Este y a que éstas en pie de igualdad se integren al comercio internacional, podría ser que a la victoria sobre el comunismo le siguiesen el caos y la confusión en vez de la renovación y el desarrollo de la economía.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

CREATING A MARKET ECONOMY IN EASTERN EUROPE: THE CASE OF POLAND. David Lipton y Jeffrey Sachs en *Brookings Papers on Economic Activity*, n.º 1, págs. 75-147; 1990.

THE ROAD TO A FREE ECONOMY: SHIFTING FROM A SOCIALIST SYSTEM: THE EXAMPLE OF HUNGARY. Janos Kornai. W. W. Norton & Company, 1990.

ACCELERATING PRIVATIZATION IN EASTERN EUROPE: THE CASE OF POLAND. Jeffrey Sachs. Washington, D.C., World Bank Annual Conference on Development Economics, 1992.

STRUCTURAL ADJUSTMENT AND INTERNATIONAL TRADE IN EASTERN EUROPE: THE CASE OF POLAND. A Berg y J. Sachs en *Economic Policy* (en prensa).

La técnica del pinzamiento de membrana

Un procedimiento sencillo para aislar canales iónicos de las membranas celulares. Sus autores, ganadores del premio Nobel por tal descubrimiento, explican lo que la técnica ha revelado sobre la señalización celular

Erwin Neher y Bert Sakmann

La transmisión de señales entre células, y en el interior de éstas, se halla mediada por canales iónicos, proteínas formadoras de poros incrustadas en las membranas plasmáticas de casi todas las células. En el organismo, los canales iónicos producen los destellos de la actividad eléctrica que excita neuronas y células musculares. En los órganos de los sentidos, los canales trasforman los estímulos físicos o químicos en señales eléctricas dirigidas al sistema nervioso. Incluso células sin conexión con el sistema nervioso central (las de la sangre, del sistema inmunitario, del hígado y otros órganos) usan canales iónicos en procesos de señalización.

Desde los años cincuenta los biólogos han podido estudiar, en un nivel macroscópico, las corrientes eléctricas que se originan a partir de estos flujos iónicos. Pero hubo que esperar a los años setenta para que el examen aislado de los canales de iones se convirtiera en realidad. La técnica del pinzamiento, por cuyo descubrimiento acabamos de recibir el premio Nobel de fisiología y medicina, permitió acceder a estos detalles.

Aunque su desarrollo y perfeccionamiento se ha prolongado durante años, la técnica es bastante simple: una pipeta de vidrio muy fino y con un diseño adecuado se apoya firmemente contra una membrana celular; queda así aislada una zona pequeña de la membrana con los canales iónicos que contiene. Estos canales pueden manipularse por procedimientos químicos o eléctricos y de ello obtener datos que permitan deducir sus propiedades. El investigador puede extraer un fragmento de la membrana o abrir con cuidado una ventana en la célula para modificar sus constituyentes citoplasmáticos. En todas esas aplicaciones, la técnica del pinzamiento ha facilitado el examen de la influencia de los canales iónicos en el potencial de membrana, en la secreción y en la contracción, entre otros procesos.

Centenares de laboratorios de todo el mundo han adoptado y extendido el uso de la técnica del pinzamiento desde que la introdujimos en 1976. Cuanto aquí exponemos sobre lo que este procedimiento ha revelado acerca de los canales iónicos y sus funciones se basa no sólo en nuestras aportaciones, sino también en las de muchos otros investigadores.

Nuestro interés por los canales ionicos nació de la lectura de dos artículos fascinantes que aparecieron en 1969 y 1970, cuando preparábamos la tesis de doctorado y nos dedicábamos al estudio de la biofísica de las membranas en el departamento de psiquiatría del Instituto Max Planck de Munich. Los artículos estaban relacionados con el tema de las membranas lipídicas artificiales, que en su forma pura son aisladores eléctricos. Ross C. Bean y sus colaboradores, de la empresa Ford Aerospace, y Steven Hladky y Denis Haydon, de la Universidad de Cambridge, demostraban en ellos que, si se insertaban en las membranas trazas de ciertos antibióticos o proteínas, se hacían conductoras de electricidad. Los cambios discretos en la corriente que discurre a través de las membranas sugerían que las proteínas creaban canales semejantes a poros que se abrieran y cerraran uno a uno. Los iones cargados podrían así atravesar la membrana por los canales abiertos.

Resultaba claro, para muchos, que las señales eléctricas en las neuronas y en otras células debían estar mediadas por proteínas semejantes en las membranas plasmáticas de naturaleza lipídica que las rodean. Allan L. Hogdkin y Andrew F. Huxley, de Cambridge, habían invocado antes el concepto de canales iónicos en su análisis clásico de las corrientes a través de las membranas de los nervios, por el que recibieron el premio Nobel en 1963. Quienes trabajábamos en biofísica de membranas veíamos que, en cuanto se perfeccionasen las técnicas de medida para conseguir la resolución adecuada, se descubriría todo un microcosmos de moléculas de señalización.

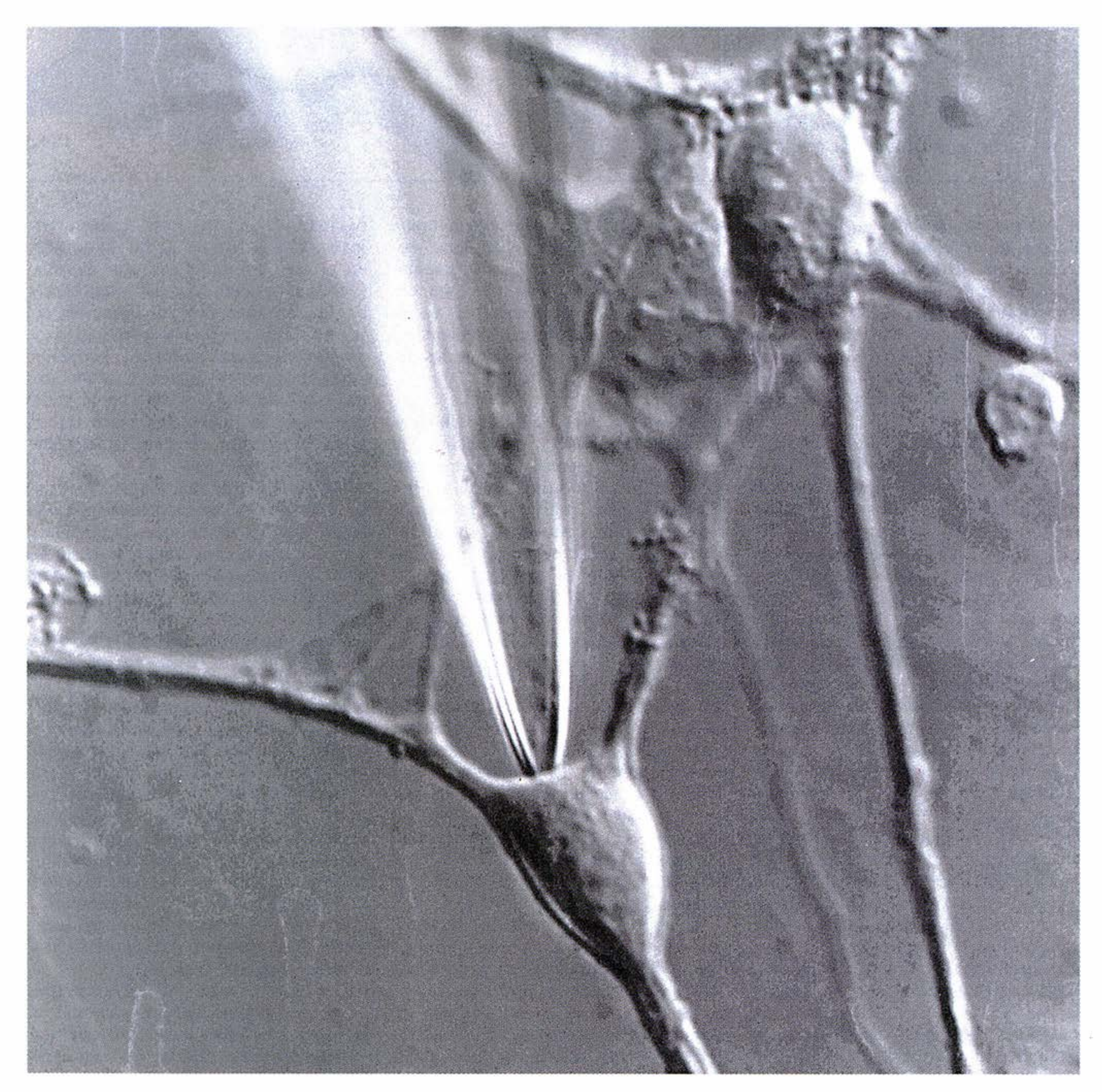
En los años siguientes continuaron acumulándose datos acerca de los canales iónicos de membranas celulares. Recordemos, en particular, el análisis estadístico de las fluctuaciones de potencial en la unión neuromuscular (sinapsis entre una neurona motora y una fibra muscular) que en el University College de Londres llevaron a cabo Bernard Katz y Ricardo Miledi, en 1972; llegaron a la conclusión de que las señales sinápticas consistían en pequeños fenómenos eléctricos, iguales en magnitud a los relacionados con canales artificiales.

ERWIN NEHER y BERT SAKMANN recibieron conjuntamente en 1991 el premio Nobel de fisiología por su descripción de los canales iónicos mediante su técnica del pinzamiento de membrana. Neher es director del departamento de biofísica de las membranas del Instituto Max Planck de Química Biofísica de Göttingen. Cursó la carrera de físicas en el Politécnico de Munich, donde se doctoró, tras una etapa de profundización en Estados Unidos, en 1970. Sakmann es director del departamento de fisiología celular del Instituto Max Planck de Investigaciones Médicas de Heidelberg. Terminó sus estudios médicos en 1969 en la Universidad de Munich. Entre 1970 y 1973, gracias a una beca del Consejo Británico, estudió biofísica en Londres con Bernard Katz, premio Nobel también.

Pero Katz y Miledi sólo pudieron inferir las propiedades de los canales a partir de su análisis, y éste dependía de varias hipótesis. No se disponía entonces de métodos que permitiesen la medición directa de los fenómenos unitarios que constituyen la señal sináptica. El ruido de fondo de las técnicas habituales de medida de la corriente eléctrica que pasa a través de una membrana era de sólo la diezbillonésima de ampère, valor, sin embargo, que centuplicaba todavía el correspondiente a una señal unitaria, lo que bastaba para ahogarla.

En 1973 decidimos abordar la reducción del ruido de fondo. Sabíamos que, con los componentes electrónicos disponibles, se podía conseguir la resolución necesaria para la medida, a condición de que se lograse aislar del resto un pequeño fragmento de la membrana. Aplicamos una micropipeta de vidrio a la superficie de fibras musculares, sometidas a previa limpieza enzimática. Nos guiaba la esperanza de que la pipeta de vidrio no conductora aislaría algunos canales iónicos, y que con ello obtendríamos una señal clara.

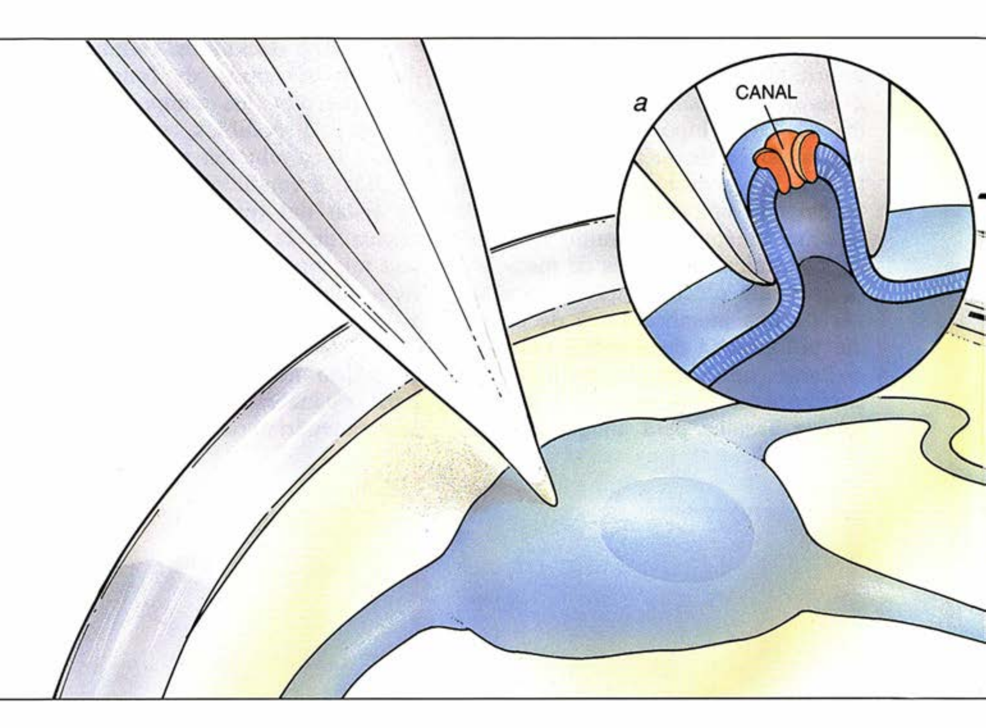
No resultaba nada fácil conseguir un cierre perfecto entre la pipeta de vidrio mensuradora y la membrana. Lo mismo que muchos otros que nos habían precedido en el uso de pipetas extracelulares, tuvimos que enfrentarnos con las fugas eléctricas que conectaban el líquido extracelular con el interior de la pipeta. Sin embargo, gracias a la limpieza exhaustiva de la superficie celular y a la optimización de la forma y el tamaño de la pipeta, logramos registrar corrientes de canales individuales que se producían en repuesta a la acetilcolina,



1. PIPETA FIRMEMENTE ADHERIDA a la superficie de una neurona. Con ese ardid podemos estudiar los canales iónicos de la membrana plasmática exterior. La pipeta, que mide $^{1}/_{25.000}$ pulgadas de diámetro, aísla física y eléctricamente los canales atrapados. Gracias a esa técnica de pinzamiento de la membrana celular podemos registrar la apertura y el cierre de los canales iónicos. Se está ya empleando para adentrarse en las redes de señalización del interior celular.

Triple forma del pinzamiento de membrana

Presionando con una pipeta de pinzamiento la superficie de una célula, previa limpieza enzimática de ésta, y aplicando una ligera succión, se consigue un cierre de un gigaohm alrededor de una zona minúscula de la membrana celular y los canales iónicos que contiene (*a*). Podemos aplicar entonces diversos estímulos desde el interior de la pipeta y medir el comportamiento de los canales atrapados. O bien, podemos arrancar de la célula la zona atrapada de la membrana, dejando expuesta la boca citoplásmica de los canales (*b*). Si arrancamos esa región sin perder el sello de un gigaohm (*c*), podremos alterar los constituyentes del citoplasma celular.



el transmisor (sustancia química inductora de señales) de la unión neuromuscular. Esos primeros experimentos confirmaron lo que ya se sospechaba acerca de la existencia de corrientes elementales a través de los canales iónicos, y en particular la idea de que se trataba de fenómenos pulsátiles de amplitud constante y duración variable.

La baja calidad del cierre entre la pipeta y la membrana, con el consiguiente ruido de fondo, nos impidió realizar registros finos de canales iónicos que no fuesen los que se encontraban en la unión neuromuscular. Unos años después descubrimos, por azar, que, al aplicar una ligera succión a través de la pipeta, junto con otras modificaciones de la técnica, se elevaba la resistencia hasta más de un billón de ohms, una mejora de varios órdenes de magnitud. Si tirábamos suavemente de la pipeta, comprobamos, podíamos rebanar fragmentos microscópicos de membrana para su estudio por separado. Desde entonces, el registro de canales iónicos aislados se convirtió en una técnica de alta resolución.

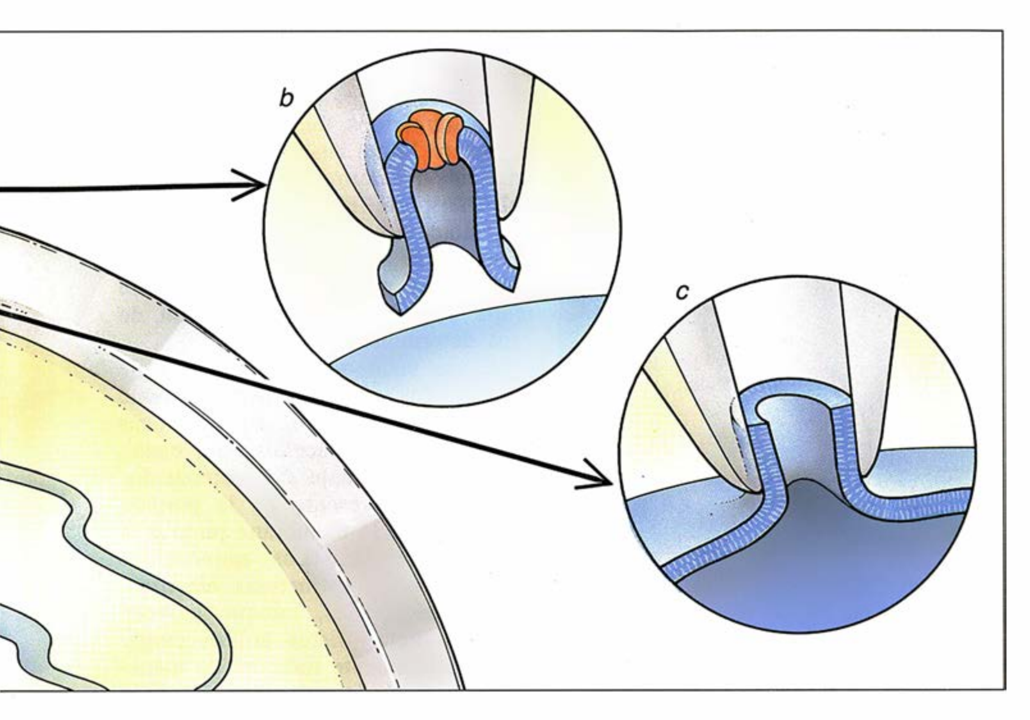
Los experimentos sobre la unión neuromuscular del músculo esquelético han aportado abundante información del papel que los canales iónicos desempeñan en la transmisión sináptica. Las neuronas presinápticas de esa zona liberan acetilcolina en cantidades multimoleculares discretas (paquetes multimoleculares) que reciben el nombre de "cuantos". Las moléculas de acetilcolina se unen transitoriamente a canales receptores de acetilcolina, constituidos por proteínas especializadas de la membrana postsináptica, y provocan una corriente que fluye a través de la membrana de la placa terminal. Esta corriente de la placa terminal es la suma de las corrientes elementales que fluyen por cientos de miles de canales.

Para medir estas corrientes elementales una a una, se presiona la punta de una pipeta de pinzamiento sobre la placa terminal de una fibra muscular. Esta región de la superficie muscular contiene el canal receptor de acetilcolina. Cuando en la solución de la pipeta está presente la acetilcolina a baja concentración, la corriente que se registra alterna entre dos niveles. A un nivel, no fluye corriente alguna, porque todos los canales iónicos del fragmento de membrana están cerrados. Cuando una molécula del canal pasa al estado abierto, como consecuencia de la aplicación de un voltaje a la membrana, fluye de manera abrupta a través de ella una corriente de unos 2,5 picoampères. Tras un período variable, la molécula pasa de nuevo al estado cerrado, y la corriente se interrumpe.

La apertura del canal del receptor se pone en marcha con la unión de éste a la acetilcolina; su separación provoca de nuevo el cierre del canal. La gran variabilidad del período de tiempo que el canal permanece abierto o cerrado refleja la naturaleza probabilística de las interacciones entre las moléculas de acetilcolina y sus receptores. La amplitud de los saltos de corriente representa la capacidad del canal para transportar iones, como los de sodio o potasio en el caso del canal receptor de acetilcolina. Al comparar las amplitudes de la corriente y la distribución de la duración con las predicciones de las diversas hipótesis, podemos determinar cómo interactúan los iones con una molécula del canal y de qué modo la interacción entre transmisor y receptor controla la apertura y el cierre del canal.

En las sinapsis del sistema nervioso central, los aminoácidos glicina, ácido gamma-aminobutírico (GABA) y L-glutamato constituyen los principales elementos de señalización para el establecimiento de comunicaciones rápidas. La forma pulsátil de las corrientes registradas sobre los canales que se ligan con estos transmisores indica que también se abren y se cierran al azar. Los canales de los receptores pueden, por tanto, funcionar a la manera de los canales del receptor de acetilcolina en la placa terminal. A pesar de lo cual, los canales dependientes de transmisores en el sistema nervioso central presentan a menudo complejidades adicionales, como la de que algunos podrían hallarse sólo parcialmente abiertos o cerrados, y la de que puedan existir subtipos diferentes en las diversas regiones del cerebro.

La transmisión de información desde el sistema nervioso central a la placa neuromuscular tiene que ser extremadamente rápida. En los axones neuronales cubiertos de mielina que transportan esas señales en los vertebrados, la conducción no está mediada por canales dependientes de



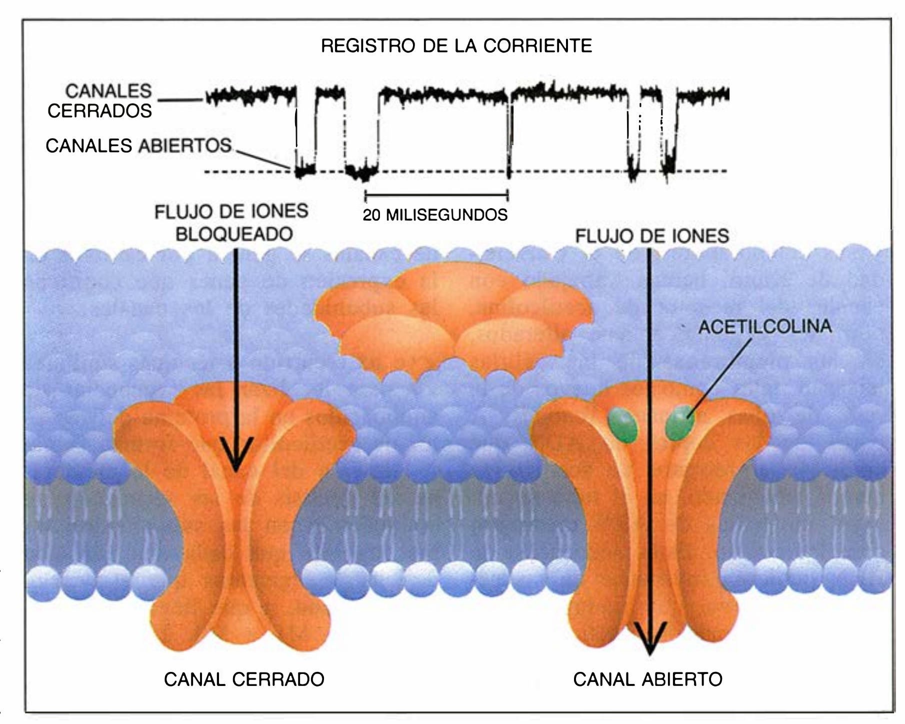
transmisores con compuerta como los que acabamos de describir, sino que lo está por canales más rápidos, que responden a cambios del voltaje de la membrana, a la diferencia de potencial eléctrico entre el interior y el exterior de la célula.

Los canales de iones de sodio dependientes de voltaje son los responsables de la elevación rápida del potencial de acción de las neuronas. El análisis de las corrientes elementales de sodio indica que los canales sensibles al voltaje alternan entre dos estados y tienen una gran probabilidad de abrirse poco después del inicio de un cambio de voltaje. Las corrientes que apoyan el impulso nervioso se generan por la superposición de decenas de millares de tales corrientes elementales de sodio. Los canales para otros iones, como los del potasio y del calcio, dependientes de voltaje, parecen funcionar a la manera de los canales de sodio, y comparten con ellos muchos rasgos estructurales.

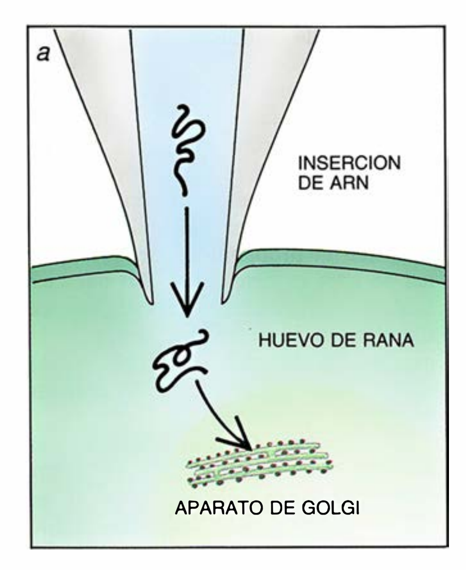
La técnica del pinzamiento de membrana aplicada a los canales dependientes de transmisores y de voltaje ha revelado mecanismos moleculares dinámicos de un nivel de detalle mucho más fino que el aquí expuesto. En casi todos los canales iónicos estudiados, se nos manifiesta que el fenómeno elemental no es un pulso de corriente, sino una serie de pulsos transitorios y separados por breves intervalos. Cuando un canal de receptor en la placa terminal de una unión neuromuscular se engarza en la acetilcolina, por ejemplo, se abre y se cierra varias veces antes de que la acetilcolina se disocie finalmente de él.

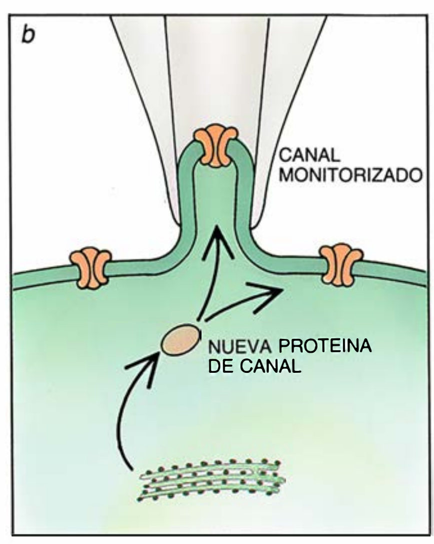
Hemos investigado la estructura de estas transiciones de los canales de la placa terminal en colaboración con David Colquhoun, del University College de Londres. Haciendo uso de la teoría de probabilidades hemos calculado el número de estados que un canal de acetilcolina adopta durante una sucesión de aperturas y cierres, así como la frecuencia de transición de un estado a otro. Tales estudios nos indicaban que cada receptor poseía dos lugares de unión para la acetilcolina. Cuando ambos lugares están ocupados por moléculas de acetilcolina, la probabilidad de que el canal se abra es cercana al 100 por cien. Dada la concentración elevada de acetilcolina en la hendidura sináptica, los canales de la placa terminal pueden actuar como interruptores de corriente cotrolados químicamente.

Los canales de membrana se nos muestran heterogéneos. En un mismo fragmento de membrana aparecen activadas dos o más clases de canales estrechamente emparentadas. Los farmacólogos conocen, desde hace años, la existencia de diferentes subtipos de receptores; ahora bien, gracias a las herramientas mucho más finas hoy disponibles, verbigracia el ADN recombinante, se ha visto que la diversidad de subtipos es muy superior a la imaginada. Para cada tipo de canal, esté mediado por transmisor o por voltaje, existen varias versiones o subtipos con distinta conductancia o propiedades referentes al control de su compuerta que forman una familia de canales. Los estímulos externos y la etapa de desarrollo de un organismo pueden alterar el mosaico



2. CANALES RECEPTORES de la placa terminal neuromuscular: se abren en respuesta al transmisor acetilcolina. En ausencia de acetilcolina, no pasa la corriente a través del canal. Cuando la acetilcolina se liga al receptor, se produce una corriente elemental de unos pocos picoampères. La duración de estas corrientes y el intervalo entre ellas varían.





3. HUEVOS DE RANA MANIPULADOS POR INGENIERIA GENETICA, una herramienta útil para el estudio del comportamiento de los canales iónicos. Se pueden inyectar secuencias de ARN que codifican subunidades de los canales iónicos en el interior de un huevo (*a*). El huevo sintetizará entonces las proteínas del canal y las insertará en la superficie de su membrana, dejándolas así accesibles a la pipeta especial para experimentos de pinzamiento (*b*).

de subtipos de canales que se encuentran en las membranas celulares.

Misión primera en toda investigación de los canales de membrana es la de averiguar la relación entre las propiedades funcionales de esos poros y sus estructuras tridimensionales. Para cumplir ese objetivo hay que localizar y cambiar secuencias críticas de aminoácidos en la proteína del canal, a fin de observar luego el efecto de dichas alteraciones en el funcionamiento del canal.

Pudo acometerse ese tipo de experimentos una vez se consiguió clonar y secuenciar el ADN de cada subunidad del receptor de acetilcolina. En esa línea, junto con Shosaku Numa y sus colaboradores, de la Universidad de Kioto, hemos trabajado con canales del receptor de acetilcolina, normales y genéticamente alterados, en las membranas de las células huésped, tales como los huevos de la rana de uñas africana *Xenopus*. A partir de las copias de ADN que codifican el receptor de acetilcolina hemos sintetizado, en el tubo de ensayo, moléculas de ARN mensajero complementario. Estas secuencias de ARN pudieron inyectarse en las células del huevo, que tradujeron entonces la información genética en proteínas del receptor y las insertaron en las membranas celulares. Las propiedades funcionales de estos canales de receptor recombinantes son semejantes a las de los canales de la placa terminal en la unión neuromuscular.

Esta combinación de técnicas nos permitió descubrir las diferencias estructurales entre los subtipos de los canales de la placa terminal en el músculo. El registro de la corriente elemental de la placa terminal ha revelado que el músculo de mamífero produce dos subtipos de canales de placa terminal: un subtipo de baja conductancia, que aparece predominantemente en el músculo fetal y en el del neonato, y un subtipo de conductancia elevada con propiedades diferentes de compuerta, que se expresa en los músculos del adulto. Durante el desarrollo postnatal, el subtipo fetal desaparece gradualmente y se sustituye por el subtipo adulto. Como han revelado los experimentos con técnicas de ADN recombinante, el cambio de los tipos de canales se genera por cambios en la expresión de genes que codifican las subunidades de los canales.

Se ha recurrido a técnicas similares para localizar las secuencias de aminoácidos en la proteína del receptor de acetilcolina que forman la pared interna del canal de la membrana. El análisis de las secuencias de aminoácidos en las subunidades había sugerido que cada una constaba de cuatro segmentos que atraviesan la membrana, y que llevan la designación de M1 a M4. El canal del receptor de acetilcolina parecía estar recubierto por varios segmentos que atraviesan la membrana, como las duelas de un tonel; habría una subunidad para cada segmento.

Con técnicas de ADN recombinante hemos conseguido genes de canales quiméricos, constituidos por subunidades de especies (vaca y raya eléctrica) cuyos canales tienen propiedades conductoras diferentes. Al analizar las propiedades de estos canales quiméricos, descubrimos que el segmento M2 y sus regiones vecinas encerraban determinantes importantes del transporte iónico. La inducción de mutaciones que provocaban sustituciones de aminoácidos en esas regiones nos permitió perfeccionar el mapa y precisar la localización de esos determinantes.

Hemos visto que tres cúmulos de aminoácidos cargados negativamente pueden formar anillos en las bocas extracelular e intracelular del canal; un anillo semejante de aminoácidos polares está presente en la porción que atraviesa la membrana junto a la boca intracelular. (Los aminoácidos polares poseen estructuras eléctricamente polarizadas, aunque carecen de carga neta.) Estos anillos cargados negativamente influyen de manera decisiva en la velocidad del flujo de la corriente y pueden seleccionar iones particulares para su transporte a través de la membrana: se permite el paso de iones sodio y potasio, cargados positivamente, mientras que se impide el paso de iones cloruro, cargados negativamente. Nuestros resultados sugerían que los aminoácidos polares, situados también junto a la parte intracelular del segmento de M2 que atraviesa la membrana, formaban la parte más estrecha del canal del receptor de acetilcolina.

La técnica del pinzamiento no se limita a revelar los pormenores moleculares de la función del canal; podemos valernos de las pipetas para el estudio de mecanismos de señalización celular, un procedimiento denominado análisis por pinzamiento de voltaje. Esta técnica aventaja a los microelectrodos convencionales en la medición de fenómenos en células pequeñas.

El análisis por pinzamiento de voltaje por medios convencionales contribuyó decisivamente al esclarecimiento de los procesos de señalización en el sistema nervioso. Lo introdujo en 1949 Kenneth S. Cole, del Laboratorio de Biología Marina de Woods Hole. Hodgkin y Huxley lo usaron para desentrañar los mecanismos básicos de la excitabilidad del nervio. La técnica implicaba, en palabras de Cole, la "doma del axón": forzar un potencial transmembrana sobre el axón de una neurona. Las corrientes de membrana resultantes pueden entonces medirse e interpretarse.

Por desgracia, la mayoría de las técnicas de pinzamiento de voltaje requiere que ambos cables axiales o al menos dos microelectrodos se in-

serten en una célula, lo que generalmente sólo es posible con los tipos mayores de células animales o vegetales. Las células de mamíferos, cuyo diámetro varía de 10 a 30 micrometros, a duras penas toleran el impalamiento con un microelectrodo estándar. Antes de que se hubiera desarrollado la técnica del pinzamiento de la membrana se conocía mucho mejor el potencial de acción en el axón del nervio gigante del calamar que los impulsos nerviosos del cerebro humano; en el ámbito de las células vegetales se conocían mejor las señales de algas gigantes, que las del maíz, las del trigo o las de la remolacha.

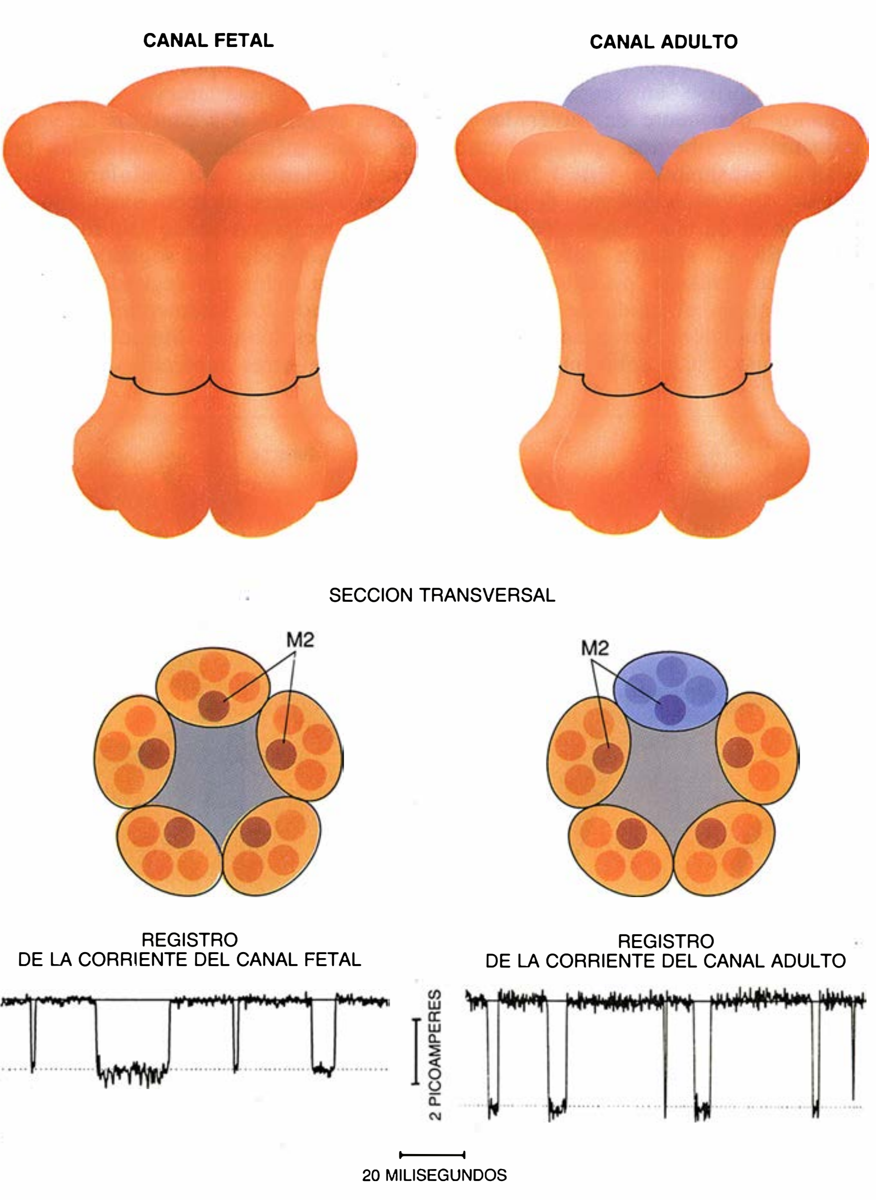
La posibilidad lograda de un cierre de un gigaohm entre una pipeta de pinzamiento y una membrana celular puso a nuestro alcance el mundo de las células de los mamíferos y el de otras células pequeñas. No sólo nos facultaba para medir los canales de membrana, sino también para aplicar el pinzamiento de voltaje a células pequeñas. Con un poco de suerte se puede desprender el retazo de membrana pinzado sin romper el cierre o sello de la pipeta con la membrana circundante, abriendo así un acceso al citoplasma. Esta configuración, que recibe el nombre de registro con célula entera, se asemeja al clásico impalamiento con microelectrodo. Con el añadido de que lo toleran células mucho más pequeñas y proporciona un control mucho mejor sobre el medio intracelular.

El registro con célula entera mediante este tipo de pipeta se cuenta ya entre los procesos rutinarios de la investigación en cultivos celulares de mamíferos. Las propias plaquetas y hematíes humanos —células de unos pocos micrometros de diámetro— han podido someterse a pinzamientos de voltaje con este tipo de pipetas. Así, la mayoría de los tipos celulares de interés clínico se han hecho accesibles a un análisis biofísico, y en muchas enfermedades, como la fibrosis quística, se ha podido establecer una relación con el funcionamiento deficiente de dichos canales.

La precisión alcanzada recientemente en el registro con célula entera ha tenido una acogida muy favorable por parte de quienes investigan las señales eléctricas en el sistema nervioso central. Por culpa de su complejidad, las técnicas de pinzamiento de voltaje que se venían utilizando sólo podían aplicarse a neuronas aisladas. El interés biológico de los resultados obtenidos con aquéllas es limitado, porque las células no están en contacto con sus vecinas naturales. Puede darse que los canales estudiados en células en cultivo no presentaran idénticas propiedades cuando se hallen en el órgano del que proceden. Incógnitas que resultan preocupantes si hablamos de células del sistema nervioso central, que poseen una especificidad muy elevada y una arquitectura muy elaborada.

Así las cosas, diseñamos una estrategia para aplicar el método de registro con célula entera al tejido cerebral respetando el entorno natural de las neuronas. Per Anderson, de la Universidad de Oslo, y Tomo Takahashi, de la Universidad de Kioto, habían ideado un procedimiento para obtener una pequeña rebanada de tejido cerebral de un centímetro de ancho. La superficie de las neuronas se limpia de células de glía y de otros tejidos adherentes proyectando con gran cuidado, sobre la superficie de la rebanada, solución de lavado. Luego, se presiona con la punta de la pipeta de pinzamiento sobre la superficie de una de las neuronas expuestas hasta perforar la membrana para realizar el registro de una célula. Semejante procedimiento no permite medir las corrientes sinápticas con una resolución que supera en 10 a 50 veces la que se consigue con los microelectrodos intracelulares.

Cuando una de las neuronas libera glutamato de sus estructuras presi-



4. ESTRUCTURA de los canales receptores de acetilcolina, estructura que guarda relación con su función. Cada canal consta de cinco subunidades; cada subunidad contiene cuatro segmentos de transmembrana. El segmento M2 de cada subunidad recubre el interior del canal, a modo de duela en un tonel. El feto de los mamíferos produce un receptor de acetilcolina en las placas terminales neuromusculares que difiere del que posee el adulto en una de las subunidades. La diferencia de esta subunidad en el segmento M2 hace que las corrientes elementales sean menores.

nápticas, induce corrientes excitadoras postsinápticas (CEP) o corrientes inhibidoras postsinápticas (CIP) en una neurona vecina. (Las CEP aumentan la probabilidad de que se genere un potencial de acción y se liberen transmisores propios; las CIP rebajan esa probabilidad.) En el registro con célula entera, las amplitudes del pico de las CEP y de las CIP fluctúan al azar en pruebas sucesivas. Esta observación sugiere que las CEP y las CIP son el resultado de la superposición casi simultánea de fenómenos "cuánticos", de manera semejante a lo que ocurre con los fenómenos "cuánticos" que dan origen a las corrientes de la placa terminal en la unión neuromuscular.

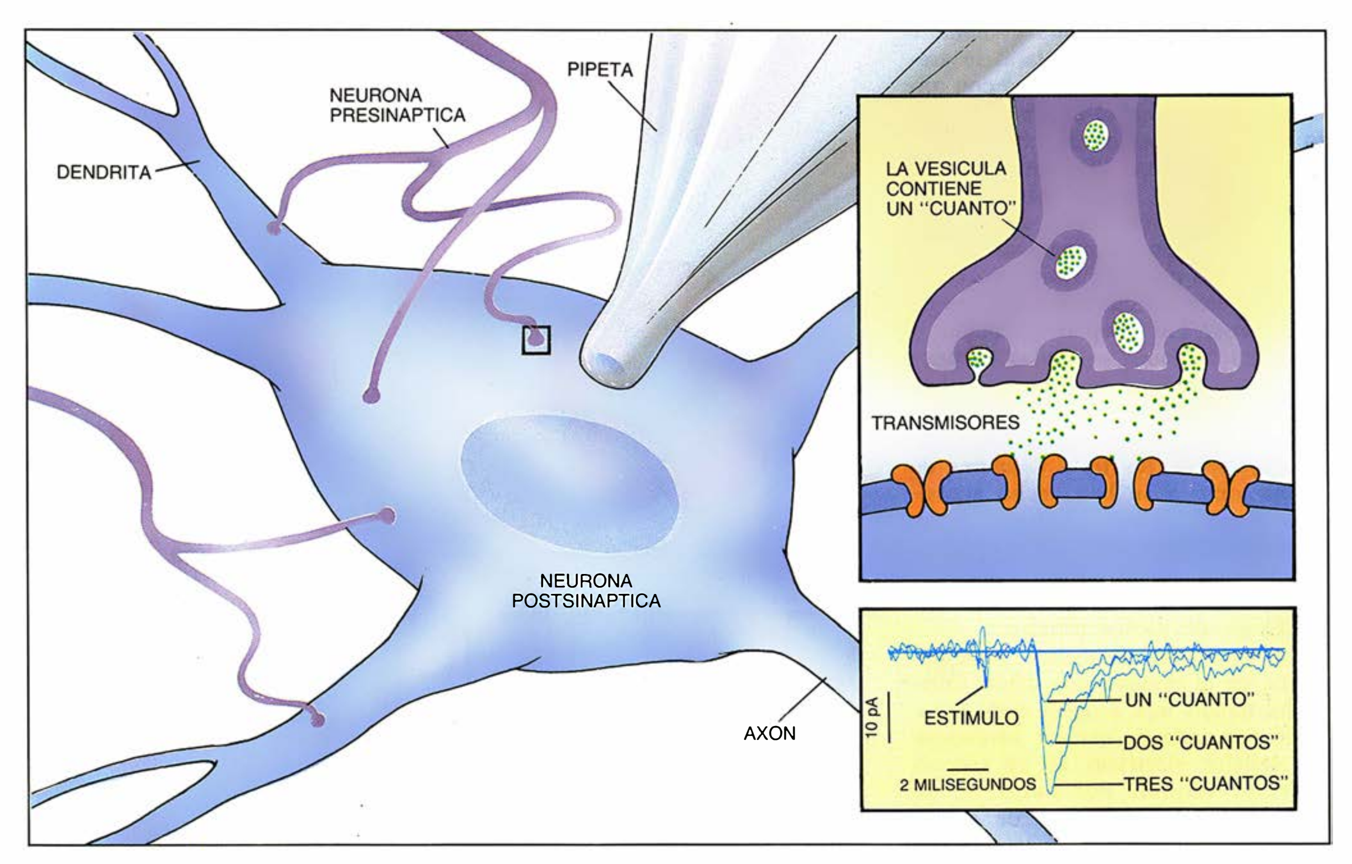
Con sorpresa por nuestra parte comprobamos que sólo unos 20 o 30 canales de receptores postsinápticos parecen abrirse en respuesta a un "cuanto" o paquete de moléculas de transmisores liberadas por una única vesícula presináptica. Este número es menor, en varios órdenes de magnitud, que el de una sinapsis neuromuscular. En el sistema nervioso, esa respuesta limitada permite, a buen seguro, afinar el grado de excitación o de inhibición provocado por las señales que actúan sobre una neurona.

La resolución de tales fenómenos "cuánticos" en el sistema nervioso central nos faculta para distinguir los factores presinápticos y postsinápticos que subyacen en los cambios de rendimiento sináptico. Tales cambios se han observado a raíz del uso o de la ejercitación de una neurona. La comprensión de la eficiencia sináptica puede, por tanto, ayudarnos a entender el sustrato biológico del aprendizaje y de la memoria.

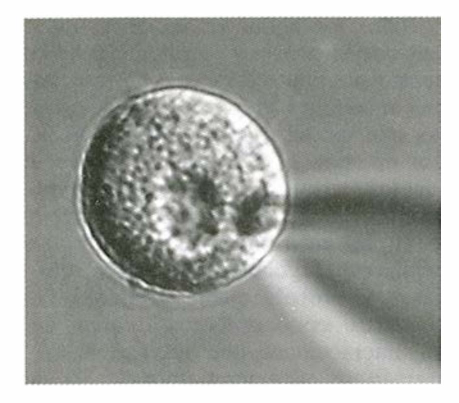
Los canales iónicos forman parte de una red compleja de mecanismos de señalización en la que intervienen también segundos mensajeros: moléculas capaces de transportar señales desde la superficie de las células hasta su interior, en su difusión a través del citoplasma. Las actividades de muchos tipos de canales que responden primariamente a transmisores externos o a cambios de voltaje están influidas o moduladas por esas sustancias intracelulares. Los canales iónicos ejercen, asimismo, un efecto recíproco sobre las funciones de las moléculas del segundo mensajero: casi todos los segundos mensajeros conocidos interactúan con ciertos canales iónicos, directamente o a través de otras moléculas, incluidas las quinasas (enzimas que fosforilan moléculas) y las proteínas G (que acoplan receptores a enzimas que catalizan la formación de muchos segundos mensajeros).

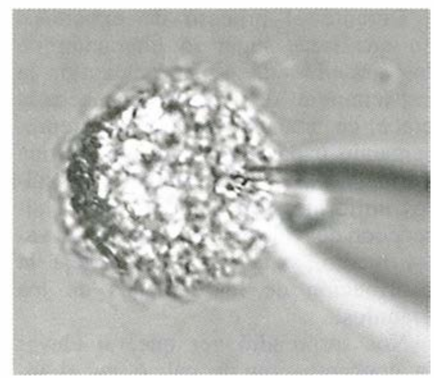
Buena parte de los canales iónicos de potasio, de las neuronas, se hallan condicionados por el potencial de membrana y por la concentración intracelular de los iones de calcio. Si esta concentración es baja, no se abrirán los canales de potasio, salvo que las despolarizaciones (cambios en el potencial de membrana) sean muy grandes; cuando la concentración de calcio es alta, comienzan a abrirse con despolarizaciones moderadas o incluso con el potencial de reposo.

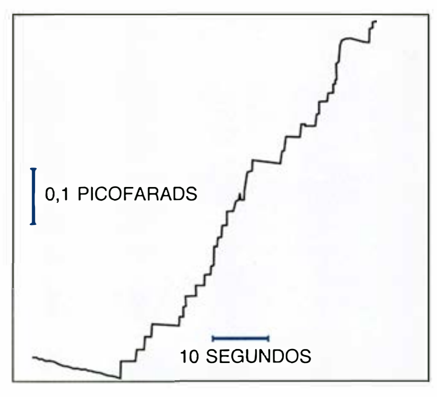
Los canales que específicamente controlan la entrada de iones calcio en la célula están, a su vez, regulados por las concentraciones del ion calcio. Estos canales se abren en respuesta a despolarizaciones, si bien algunos tipos los desactivan los iones calcio que penetran en la célula. Podemos ver en ello un mecanismo de retroinhibición que regula los niveles de calcio, que es, a su vez, un segundo mensajero importante para muchas actividades celulares.



5. EL REGISTRO CON CELULA ENTERA, en el que una pipeta de pinzamiento ocupa el lugar del microelectrodo convencional, ha revolucionado el estudio de las células de mamíferos, y en particular de las neuronas. Los científicos pueden trabajar ahora con pequeños cortes de tejido nervioso que contienen neuronas en contacto con su entorno natural. La técnica, muy sensible, detecta corrientes de excitación y de inhibición inducidas en las neuronas por paquetes ("cuantos") individuales de transmisores contenidos en una vesícula presináptica (*recuadro*). Registró el trazado de la corriente Peter Stern.







6. LA CELULA CEBADA (*a la izquierda*) **segrega histamina y otros compuestos en respuesta a un estímulo aplicado a través de una pipeta de pinzamiento** (*centro*). **La técnica de pinzamiento de membrana sirve para medir los cambios de la capacitancia de la membrana que corresponden a la fusión de una sola vesícula secretora con la membrana plasmática. Cada fusión se traduce en un salto en el registro de la capacitancia** (*derecha*). **Fotografías de Julio M. Fernandes.**

No debiera, pues, sorprendernos si resultó difícil resolver una red de tal complejidad de interacciones mutuas, con sinergismos y lazos de retrocontrol. El registro de la actividad eléctrica desencadenada por la estimulación de células no bastaba para deshacer los nudos de la red. Había que someter a control algunos de los reguladores intracelulares. El método de la célula entera proporcionó ese control al dejarnos manipular el contenido de una célula.

Al ser bastante amplia la zona de conexión entre el interior de la pipeta y el espacio intracelular, las moléculas se difunden rápidamente de uno a otro, lo que entorpecía el desarrollo de la experimentación. En los trabajos primeros sobre célula entera, los investigadores comprobaron que los mecanismos sutiles de control se perdían por culpa de su difusión hacia el exterior. Muchas de las moléculas controladoras solubles se diluían en el volumen relativo casi infinito de la pipeta de medida. Sólo permanecían intactos los canales muy robustos.

En el transcurso de estos años, muchos laboratorios han ido descubriendo gradualmente las concentraciones precisas de las sustancias que deben estar presentes en la pipeta para salvar la función propia de los diversos canales. Así se nos ha ido manifestando la red de interacciones entre receptores, segundos mensajeros y canales iónicos; y, con ello, se nos ha concedido la posibilidad de reconstituir algunas de las vías de señalización.

El mensaje que los canales iónicos transmiten a las células implica muy a menudo un cambio del calcio intracelular. A nosotros nos interesaba averiguar cómo llega esta señal a provocar la respuesta celular. Decidimos, pues, centrar nuestra atención sobre el papel del calcio en la secreción.

En teoría, esos estudios demandan la medición simultánea de las corrientes iónicas, la señal de calcio y la secreción en una misma célula. A cuyo ideal se aproxima bastante la combinación del registro con célula entera y un método de determinación de calcio desarrollado por Roger Y. Tsien en la Universidad de California en Berkeley. La técnica de Tsien utiliza fura-2, un colorante que cambia sus propiedades fluorescentes cuando se une al calcio. La medida de la fluorescencia del colorante permite calcular la concentración de los iones de calcio libre.

Mediante la técnica del pinzamiento podíamos seguir las corrientes de iones y la secreción de la manera siguiente. Las células segregan materiales a través de la exocitosis, proceso en el que las vesículas de almacenamiento se funden con la membrana plasmática y expulsan su contenido. El proceso comporta la fusión de las membranas vesiculares con la membrana plasmática, cuya superficie aumenta en consecuencia. Este aumento se detecta fácilmente en el cambio de la capacitancia de la membrana, que es proporcional a la superficie de ésta. Aunque el cambio sea a veces transitorio o pequeño, la medida de la capacitancia es lo suficientemente sensible como para detectar la fusión de vesículas con la membrana plasmática. En muchos tipos de células, estas señales sirven para correlacionar la secreción con la concentración de calcio intracelular y con los fenómenos electrofisiológicos.

Hemos estudiado las células cromafines de la glándula suprarrenal, que segregan las hormonas adrenalina y noradrenalina en momentos de estrés. Nuestros primeros estudios habían puesto de manifiesto que las células cromafines poseen canales de calcio dependientes del voltaje, de manera parecida a lo que ocurre con las células nerviosas. Cuando las células se estimulan eléctricamente o con acetilcolina, se abren los canales de calcio y sube la concentración de calcio, fenómeno éste que puede medirse fácilmente a través de la fluorescencia del fura-2. La capacitancia de la membrana también aumenta, señal de exocitosis.

Si un quelante de calcio —un compuesto que liga iones calcio— está presente en la pipeta, tanto la elevación de la concentración del calcio intracelular como la señal de la capacitancia se suprimen en las células cromafines. Si la pipeta contiene un nivel alto de calcio, se induce entonces un aumento del calcio intracelular y un aumento de la capacitancia. Estos resultados sugieren que la secreción por parte de las células cromafines obedece a los mismos principios que Katz y Miledi vieron que eran aplicables a la liberación de acetilcolina en la unión neuromuscular.

Cuando generalizamos esos estudios a células secretoras no excitables, quedamos sorprendidos ante la relación entre calcio y secreción. Nuestro tipo celular favorito en esta categoría es la célula cebada, que se encuentra en el tejido conjuntivo. Estimuladas con hormonas o antígenos (moléculas de otros organismos), las células cebadas segregan histamina y otros compuestos que median respuestas inflamatorias o inmunitarias. El interés de esas células para nuestro trabajo residía en su abundancia de grandes gránulos de secreción, o vesículas. Después de la estimulación se produce en estas células una vigorosa exocitosis: su superficie aumenta entre dos y cuatro veces al cabo de 10 a 20 segundos.

Durante el proceso de exocitosis en que tiene lugar la liberación de los gránulos de almacenamiento, la capacitancia de una célula cebada crece de manera escalonada, representando cada salto la fusión de una vesícula. No se trata, empero, de saltos uniformes. Su amplitud oscila alrededor de valores cercanos a un valor medio, y la variación refleja la distribución de los tamaños de los gránulos.

Nos sorprendió ver que, al elevar la concentración de calcio en el interior de las células cebadas, no se iniciase la secreción, como sucedía con las células excitables. Durante algún tiempo llegamos a pensar que ello obedecía a la difusión y pérdida de moléculas esenciales. Después supimos que estas células requerían otros estímulos. Ciertas hormonas y antígenos, cuando se aplicaban extracelularmente, provocaban una secreción vigorosa, por sí solos o en sinergismo con una señal intracelular de calcio.

Todos los estímulos conducían invariablemente a una señal prominente de calcio —un aumento momentáneo de la concentración intracelular de calcio en más de un orden de magnitud—, después de cuya aparición acontecía la secreción. El pico transitorio de calcio se debía a la liberación de iones almacenados intracelularmente. Se producía también una entrada abundante de calcio exterior por vías no dependientes del voltaje, pero con escasa repercusión sobre la respuesta secretora. Aun cuando la concentración de calcio de la célula quedara fijada dentro de niveles bajos por haber incluido una mezcla quelante en la pipeta, la desgranulación procedía a un ritmo máximo después de la estimulación externa.

No obstante, la concentración de calcio influye sobre las células cebadas. Si aquélla es muy alta, la secreción se produce con cierto retraso, hecho que podría explicar la base de muchas comunicaciones en las que se afirma que la secreción inducida por calcio se ha obtenido con inyecciones de calcio o de otras moléculas que permiten que dicho ion penetre en las células. También, porque después de la estimulación, hormonal o de otro tipo, la célula parece adquirir una mayor sensibilidad hacia el calcio: la elevación subsiguiente del nivel de calcio acelera la desgranulación ya iniciada. En estas células, pues, el calcio viene a ser uno más entre los diversos reguladores de la secreción.

Todos los hallazgos recientes indican que el proceso secretor está bajo control de una red de vías de señales con relaciones entre sí, semejantes a las que modulan los canales iónicos. Los componentes de esta red parecen ser los mismos: y de manera muy prominente, el calcio (particularmente en las neuronas y en otros tipos celulares), segundos mensajeros, quinasas y probablemente proteínas G. Nuestros conocimientos acerca de las interacciones que regulan la secreción se encuentran todavía en su fase incipiente, mientras que tenemos perfilada la red que controla los canales iónicos, gracias en muy buena parte a la técnica del pinzamiento.

En conclusión, la extraordinaria sensibilidad de la técnica del pinzamiento de membrana nos ha llevado hasta el funcionamiento molecular de los canales. Merced a esa técnica, potente y sencilla a la vez, nos es dado también estudiar las células minúsculas de los tejidos de los mamíferos y seguir la pista de las señales mediante el control del medio intracelular. A medida que aumenta el número de investigadores que la adoptan, se afianza nuestra esperanza de que seguirá siendo un instrumento eficaz para desvelar secretos que la célula aún guarda celosamente en su interior.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

IMPROVED PATCH-CLAMP TECHNIQUES FOR HIGH-RESOLUTION CURRENT RECORDING FROM CELLS AND CELL-FREE MEMBRANE PATCHES. O. P. Hamill, A. Marty, E. Neher, B. Sakmann, F. J. Sigworth en *Pflügers Archiv: European Journal of Physiology*, vol. 391, n.º 2, págs. 85-100; agosto de 1981.

THE PATCH-CLAMP TECHNIQUE IN THE STUDY OF SECRETION. Reinhold Penner y Erwin Neher en *Trends in Neurosciences*, vol. 12, n.º 4, págs. 159-163; abril de 1989.

A THIN SLICE PREPARATION FOR PATCH CLAMP RECORDINGS FROM NEURONES OF THE MAMMALIAN CENTRAL NERVOUS SYSTEM. F. A. Edwards, A. Konnerth, B. Sakmann, T. Takahashi en *Pflügers Archiv: European Journal of Physiology*, vol. 414, n.º 5, págs. 600-612; septiembre (I) 1989.

THE STRUCTURE OF ION CHANNELS IN MEMBRANES OF EXCITABLE CELLS. Nigel Unwin en *Neuron*, vol. 3, n.º 6, págs. 665-676; diciembre de 1989.

STRUCTURE-FUNCTION STUDIES OF VOLTAGE-GATED ION CHANNELS. W. Stühmer en *Annual Review of Biophysics and Biophysical Chemistry*, vol. 20, págs. 65-78; 1991.

Texturas y estructura general del cosmos

La física de partículas ofrece nuevas pistas sobre el origen de la estructura del universo. Los autores proponen que las texturas, defectos de campo primordiales, fueron las semillas de las que germinaron galaxias y cúmulos

David N. Spergel y Neil G. Turok

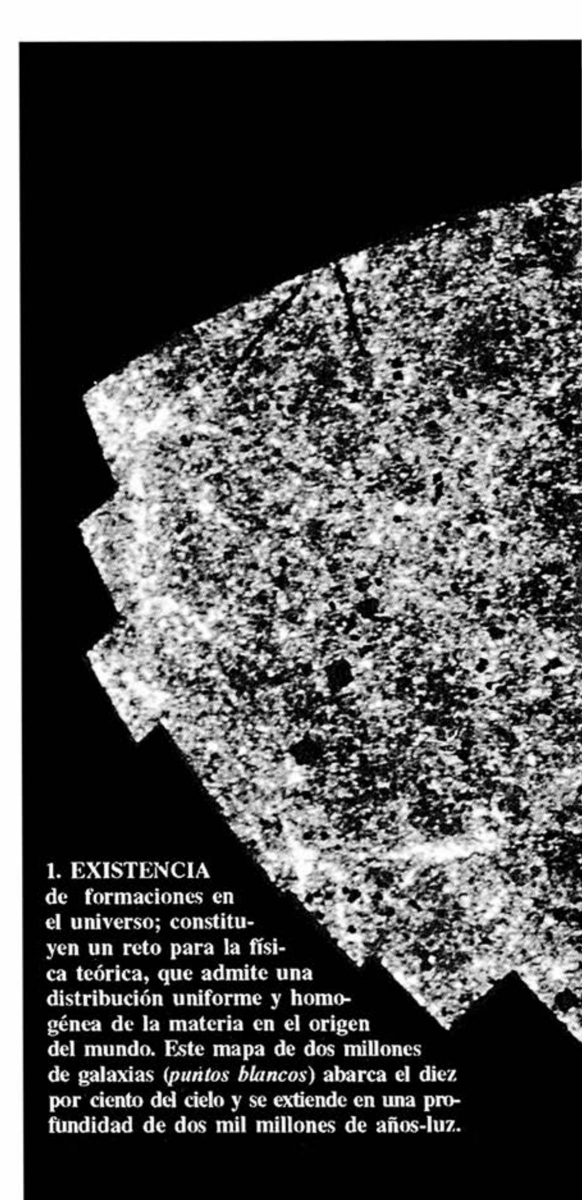
El de conocer la forma y el origen de la estructura general del universo constituye uno de los principales retos que tiene ante sí la ciencia; también es uno de los más excitantes. Análisis y observaciones recientes revelan que las galaxias se encuentran en ingentes burbujas y estratos que abarcan centenares de millones de años-luz. Se han descubierto, no hace mucho, galaxias y cuásares antiquísimos y remotos. Las medidas de precisión tomadas por el *Explorador cósmico de fondo* ("Cosmic Background Explorer", o COBE) confirman que el cielo está bañado en un resplandor de microondas de notable uniformidad, cuyo origen temporal se sitúa en los días iniciales del universo. Para comprender este conjunto de fenómenos, los cosmólogos se han ayudado de la física de las partículas. De las ideas así elaboradas, la más popular es el modelo del universo inflacionario, que describe con éxito muchos aspectos de la estructura cósmica. Pero la inflación no puede explicar del todo las macroestructuras galácticas ni la existencia de cuásares tan viejos.

Los autores del artículo hemos ahondado en un modelo alternativo, que, en nuestra opinión, iguala los éxitos explicativos de la inflación y corrige sus fallos principales. Nuestra hipótesis se construye en torno a la idea de la rotura de la simetría, un proceso central en las teorías unificadas de la física de partículas. La rotura de la simetría conduce a la formación de texturas, defectos cósmicos que habrían aparecido al poco del nacimiento del universo. Las texturas podrían haber sembrado agregados de materia que habrían evolucionado hasta desarrollar galaxias y cúmulos de galaxias. De la hipótesis de las texturas se llega a ciertas predicciones que pronto se someterán a la comprobación observacional.

DAVID N. SPERGEL y NEIL G. TUROK han colaborado en la gestación de la hipótesis de las texturas sobre el origen de la estructura general del cosmos. Spergel se doctoró en astronomía por la Universidad de Harvard en 1985. Dos años después entró en la de Princeton, donde enseña astrofísica. Turok obtuvo su doctorado en física de partículas en el Imperial College de Londres en 1983. En 1987 pasó a la Universidad de Princeton, donde da clases de física.

La teoría de la gran explosión, base conceptual de la cosmología moderna, ha aumentado su credibilidad en los últimos años; ofrece una descripción sencilla y potente de las condiciones físicas del universo, desde el instante de su origen. En la teoría de la gran explosión, el universo, con toda la materia y todo el espacio, empezó en un punto infinitésimo, hace unos 10.000 o 20.000 millones de años; desde entonces no ha dejado de expandirse. La primera prueba en favor de la gran explosión nos la suministra la observación de la actual expansión del universo: las galaxias remotas se muestran persistentemente más rojizas que las próximas, lo que implica que la luz que emiten se ha estirado (enrojecido) a medida que se iban alejando unas de otras. Retrotrayendo esa expansión en el tiempo, inferimos que el universo empezó en un estado denso e intensamente caliente; ahora se halla sumergido en un fondo generalizado de radiación de microondas que, a modo de fósil, es lo que queda de los tiempos iniciales. El satélite *COBE* ha comprobado que el espectro de energías de estas microondas se ajusta perfectamente al predicho por la teoría de la gran explosión, en confirmación espectacular de la idea de un universo extremadamente caliente y denso en su origen.

Y lo más notable: la teoría de la gran explosión predice las concentraciones relativas de los elementos ligeros (hidrógeno, deuterio, helio y



1. EXISTENCIA de formaciones en el universo; constituyen un reto para la física teórica, que admite una distribución uniforme y homogénea de la materia en el origen del mundo. Este mapa de dos millones de galaxias (*puntos blancos*) abarca el diez por ciento del cielo y se extiende en una profundidad de dos mil millones de años-luz.

litio) que hay en nuestro universo, y lo hace con precisión. De tales predicciones los cosmólogos deducen que no puede haber más de cuatro familias de partículas elementales; la experimentación acaba de resolver que sólo existen tres.

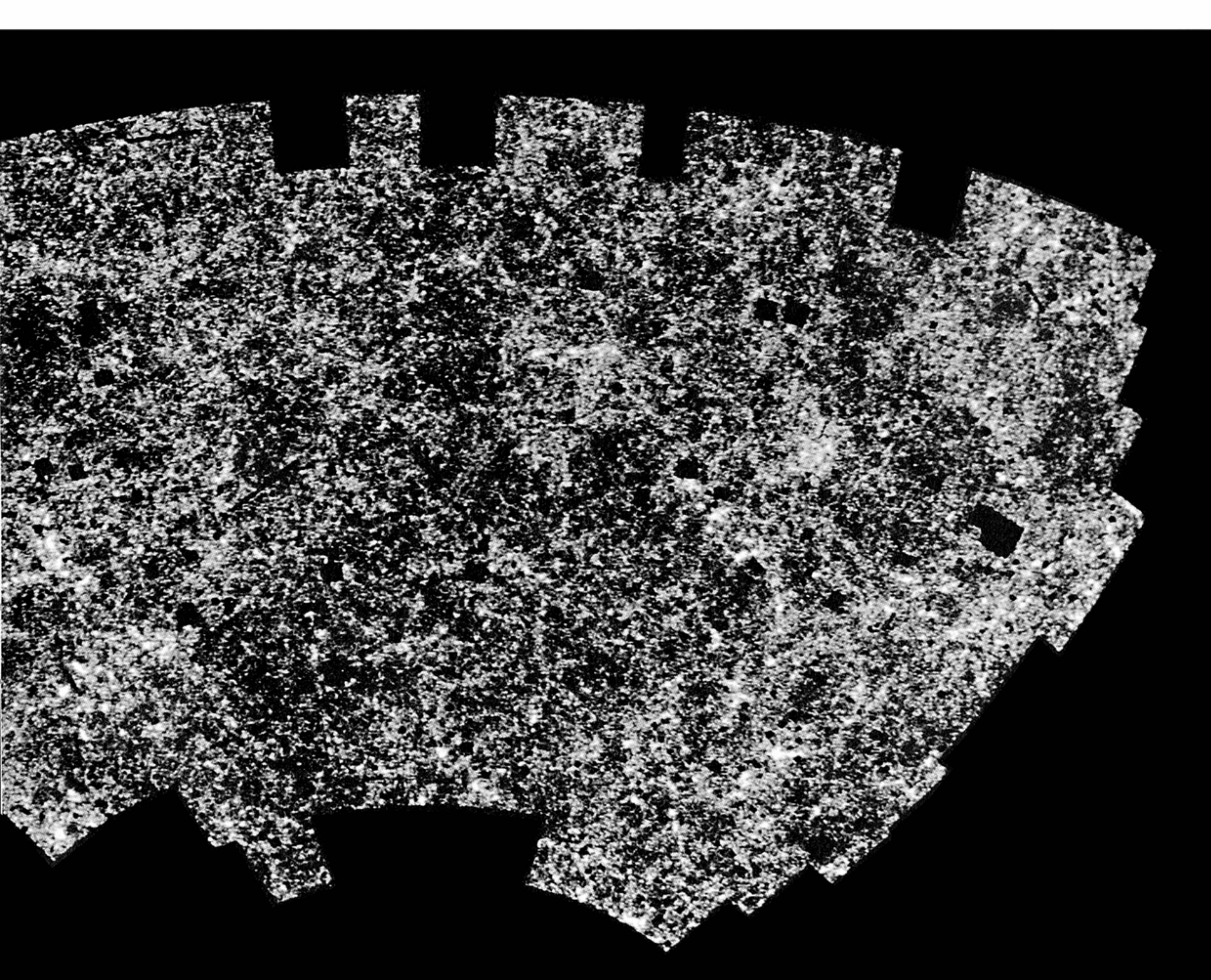
Tamaños aciertos han terminado por convencer a la mayoría de los físicos y astrónomos de que, al menos en primera aproximación, la teoría de la gran explosión tiene visos de ser correcta. Pero sigue abierta la cuestión del origen de la estructura. La explicación más sencilla es que algo (del estilo de la formación de texturas) produjo variaciones de densidad primordiales en el universo primitivo; en las regiones más densas la gravedad opone mayor resistencia a la expansión global del universo, y, por último, la gravedad supera a la expansión y provoca el colapso de las regiones. A medida que el universo envejece la gravedad podría haber agrandado las fluctuaciones de densidad primordiales, de una parte en 10.000, hasta formar galaxias, cúmulos galácticos y supercúmulos.

El rastreo exhaustivo de la distribución de las galaxias a gran escala pone de manifiesto que el universo moderno se ha alejado muchísimo de la uniformidad. Las galaxias se agrupan en estratos y burbujas, rodeados por vacíos notables. La interpretación de esas observaciones ha de hacer frente a la posibilidad de que la distribución de galaxias visibles no sea la misma que la distribución global de la materia. Hay buenas razones para pensar que la mayor parte de la masa del universo no yace en las estrellas luminosas o en nubes gaseosas incandescentes, sino que se esconde, invisible, en forma de materia oscura.

La observación de los movimientos de las estrellas y el gas que orbitan en las periferias de las galaxias indica que cada galaxia se rodea de un halo de materia oscura cuya masa decuplica, por lo menos, la de la componente visible. Abundando en lo mismo, el estudio de los movimientos de las galaxias en el seno de los cúmulos y de los movimientos de varios miles de galaxias en nuestra vecindad denuncia la presencia de una fuerza gravitatoria ejercida por materia invisible.

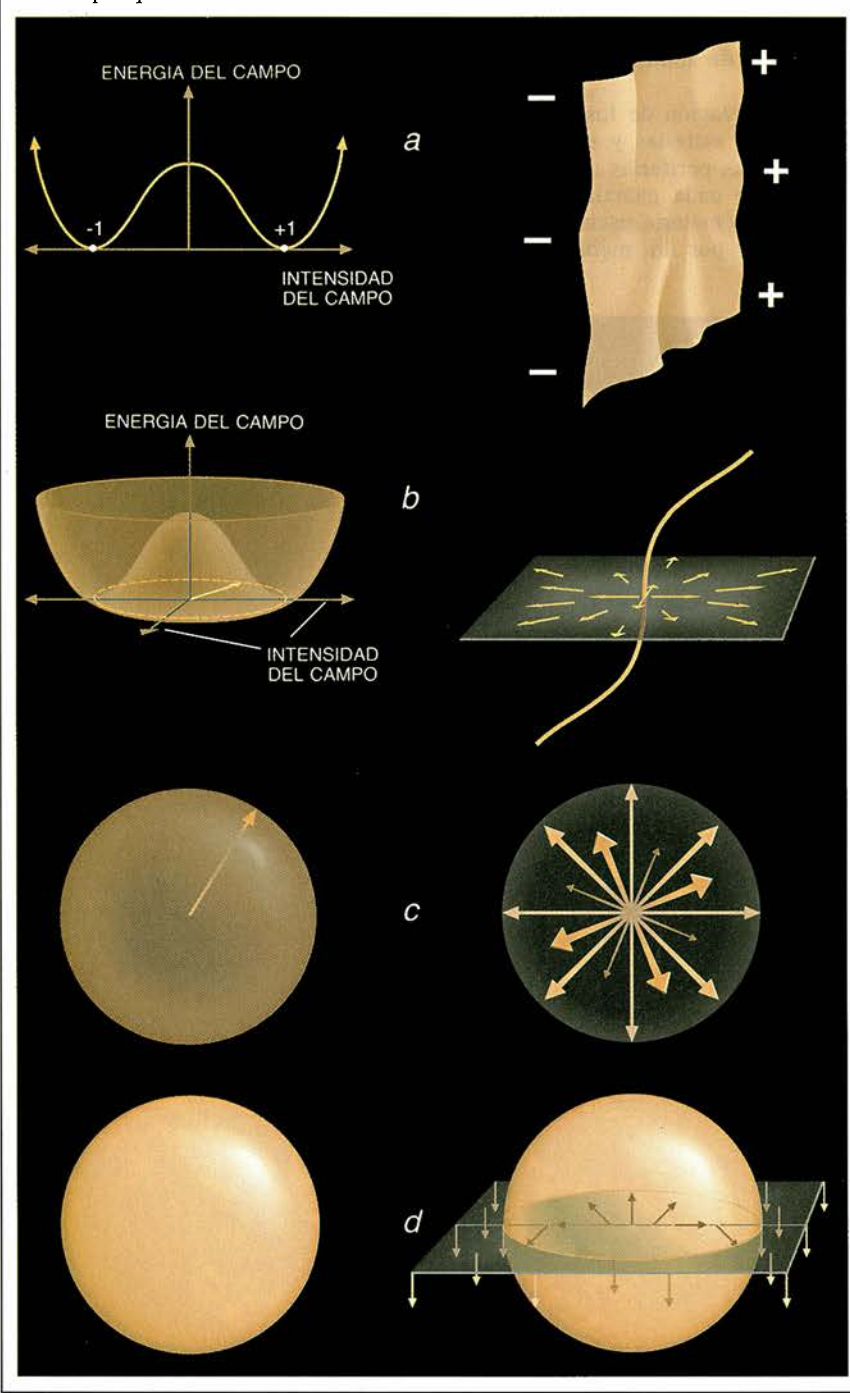
Seguimos sin conocer la naturaleza de la materia oscura, auténtica pesadilla de los cosmólogos. Entre los candidatos a la misma se nombran los agujeros negros, las estrellas de poca masa e hipotéticas partículas subatómicas. Muchos opinan que la materia oscura consiste en materiales de baja velocidad térmica, lo que se suele llamar materia oscura fría. Tal materia lenta puede acumularse bajo la influencia de la gravedad para formar objetos cuyo tamaño varía de la galaxia al supercúmulo.

En un afán por desentrañar la formación de galaxias y cúmulos, se han buscado señales de grumos en el universo primitivo; para lo cual se ha hurgado en el fondo cósmico de



Defectos topológicos

El campo de Higgs admite cuatro tipos de deformaciones, irregularidades que se crean durante una transición de fase, cuando dicho campo hipotético rompe una simetría. Cuando se rompe una simetría discreta, las paredes de dominio (*a*) separan las regiones en las que el campo de Higgs toma valores distintos (por ejemplo, –1 o +1). Las cuerdas cósmicas (*b*) se forman cuando, en la fase de la simetría rota, el campo de Higgs apunta en cualquier dirección en un espacio bidimensional. Cuando se viaja rodeando a una cuerda cósmica, el campo de Higgs gira en torno a todos esos valores. Los monopolos (*c*) aparecen cuando el campo de Higgs puede señalar en cualquier dirección de un espacio tridimensional. En el centro de estos defectos, la intensidad del campo de Higgs es nula. Se forman texturas (*d*) cuando el campo de Higgs puede elegir cualquier dirección en un espacio cuadridimensional. La ilustración muestra un corte a través de una textura. Las flechas que indican la orientación del campo en torno a la textura son paralelas, y puede así desplegarse, dejando que el campo que la rodea se reconecte con suavidad.



microondas: las variaciones locales de densidad en el universo primitivo habrían provocado cambios en la temperatura aparente de la radiación celeste. Hasta ahora, han fracasado todos los intentos de observar dichas variaciones de temperatura. Las mediciones recientes del firmamento de microondas abonan, por contra, la idea de un universo primitivo bastante uniforme. La densidad de ese cosmos originario presentaría un carácter uniforme cifrado en más de una parte en 10.000.

Las teorías acerca del origen de la estructura general del cosmos deben justificar la agrupación observada de la materia oscura y de la visible, sin dejar de guardar coherencia con la uniformidad manifiesta del fondo de microondas. Para explicar tal uniformidad (linealidad o suavidad, como se la designa a veces) se recurre a la hipótesis de la inflación. De acuerdo con ese mecanismo postulado para la teoría de la gran explosión, el universo inicial sufrió un breve episodio de expansión extraordinariamente rápida. Durante la inflación, el universo quedaría uniformizado, considerado a escala macroscópica, porque los grumos locales se habrían expandido hasta adquirir un tamaño descomunal. Al mismo tiempo, las fluctuaciones cuánticas microscópicas se habrían estirado y amplificado hasta convertirse en variaciones de densidad macroscópicas, capaces de iniciar el crecimiento de una estructura a gran escala.

La de la inflación es una hipótesis elegante, que parte de la mecánica cuántica (cuyas reglas gobiernan las partículas subatómicas más pequeñas) para explicar la generación de las macroestructuras del universo. Concuerda incluso de manera bastante razonable con las mesoestructuras, que van desde el tamaño de una galaxia (decenas de miles de años-luz) hasta la separación media entre galaxias (unos 30 millones de años-luz).

Pero la teoría inflacionaria presenta limitaciones importantes. Las fluctuaciones cuánticas son demasiado grandes, lo que obliga a ajustar ciertos parámetros de la teoría hasta valores implausiblemente pequeños, si queremos mantener en pie un edificio teórico harto delicado. Además, las observaciones de la estructura a muy gran escala entran en conflicto frecuente con ese enfoque. Steven Maddox y sus colaboradores de la Universidad de Oxford analizaron las posiciones angulares en el firmamento de más de dos millones de ga-

laxias. Descubrieron que éstas se agrupaban, a gran escala, con una intensidad mucho mayor que la postulada por la versión dominante de la teoría de la inflación.

Nosotros hemos abordado el origen de la estructura general del cosmos con un planteamiento menos ambicioso. Empezamos por inquirir qué procesos físicos podían haber creado macroestructuras en un universo caliente e inicialmente uniforme. Para nuestra sorpresa, la respuesta más prometedora no vino de astrofísicos ocupados en el estudio de galaxias remotas, sino de los físicos de partículas. Estos últimos sospechan que la rotura de simetría determina las distintas masas y cargas de las partículas elementales de la materia y separa las cuatro fuerzas mediante las cuales interaccionan. En el universo naciente, ese proceso fundamental podía haber llevado a las desviaciones de la uniformidad que se necesitan para explicar el aspecto actual del cosmos. No obstante su interés en cosmología, de la rotura de la simetría se ocuparon primero los físicos empeñados en la unificación de la flora plural de partículas y fuerzas subatómicas. La materia ordinaria está formada por electrones, protones y neutrones; a su vez, los protones y neutrones constan de dos clases de quarks. Estos quarks y el electrón y su neutrino constituyen la primera de las tres familias de las partículas elementales. Las interacciones entre estas partículas corren a cargo de cuatro fuerzas básicas: el electromagnetismo, la fuerza débil (que gobierna las desintegraciones radiactivas), la fuerza fuerte (que mantiene juntos protones y neutrones en los núcleos atómicos) y la gravedad.

Este complejo conjunto de partículas y fuerzas muestra varias sorprendentes regularidades. Las partículas tienen cargas definidas, todas múltiplos enteros de un tercio de la carga del electrón. Y las partículas correspondientes de cada familia presentan cargas idénticas, si bien difieren en la masa. La mayoría de los teóricos piensa que la repetición del esquema de las familias de las partículas es una manifestación de leyes de simetría que subyacen, ocultas, tras las bajas energías de la física ordinaria. Estas simetrías, que se evidencian en los experimentos realizados en los aceleradores de partículas de alta energía, habrían intervenido, de modo similar, en los primeros instantes del universo.

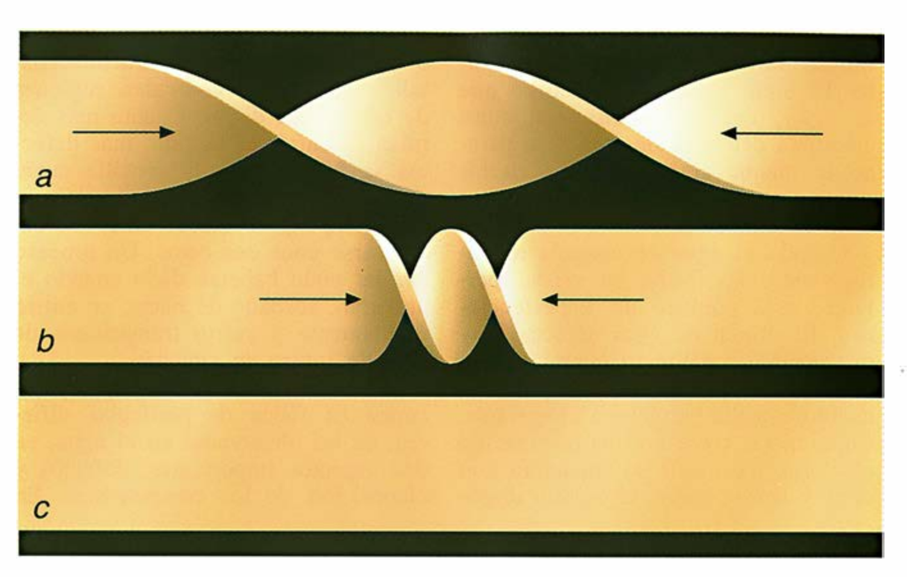
Abdus Salam, del Centro Internacional de Física Teórica de Trieste, y Steven Weinberg, de la Universidad de Texas en Austin, propusieron la existencia de tal simetría subyacente entre la fuerza electromagnética y la fuerza débil, el electrón y su neutrino y los dos quarks de cada familia. Numerosos experimentos en los aceleradores de partículas han confirmado con precisión la validez de la teoría unificada electrodébil. Los teóricos de partículas se esfuerzan en generalizar ese éxito mediante teorías de "gran unificación", que combinan la fuerza electrodébil con la fuerza fuerte y relacionan las propiedades de electrones, neutrinos y quarks.

Según estas teorías unificadas, a muy altas temperaturas la materia entra en fases desacostumbradas, de simetría exacta (no rota); en ellas, las simetrías entre partículas y fuerzas se expresan en toda su plenitud. De acuerdo con la teoría electrodébil, a temperaturas por encima de 10^{15} kelvin los electrones se muestran idénticos a los neutrinos y no se distingue la fuerza débil de la electromagnética. En el marco de las teorías de gran unificación, a temperaturas superiores a 10^{28} kelvin electrones y neutrinos se comportan de forma idéntica a los quarks, y la fuerza electrodébil se combina con la fuerte. Por último, las teorías de simetría de familia mantienen que las tres familias de partículas pierden su carácter distintivo a una temperatura similar.

En su nacimiento, el universo, extremadamente caliente, existía en un estado de perfecta simetría no rota. Pero, al expandirse, se enfrió y atravesó una serie de cambios bruscos en su estado físico, las llamadas transiciones de fase. En cada una de éstas, se rompieron algunas relaciones de simetría entre fuerzas y partículas. Así, el universo fue degenerando desde una fase en que contenía fuerzas unificadas y partículas idénticas hasta el estado actual, mejor conocido, de fuerzas y partículas distintas.

La teoría afirma que la transición de fase electrodébil aconteció al cumplir el universo su 10^{-12} segundo de vida y poseer 10^{-15} veces su tamaño actual. La transición de gran unificación habría ocurrido a una edad de 10^{-36} segundos, momento en que el cosmos no era mayor que un pomelo. La rotura de simetrías (la de familia, por ejemplo) en ese tiempo inicial podría haber producido las irregularidades del tipo de las texturas.

Esas transiciones de fase de rotura de simetrías nos parecerían abstrusas, si no fuera porque en la vida común hallamos también transiciones análogas. Los cambios repentinos en las propiedades físicas del agua cuando se hiela o pasa a vapor son ejemplos de transiciones de fase y, lo mismo que las examinadas antes en teoría de partículas, esas transiciones de fase suelen hallarse relacionadas con un cambio en las propiedades de simetría. El agua lí-



2. ESTA BANDA ELASTICA RETORCIDA nos ilustra el despliegue y la final desaparición de una textura. La orientación de la banda en cada punto de su longitud es análoga a la dirección del campo de Higgs. Un defecto de textura corresponde a un giro de 360 grados de la banda (*a*). Con el tiempo, el giro de la textura se va acortando, dejando la banda cada vez más tensa (*b*). El giro se hace tan pequeño que la banda se rompe y se reconecta sin el giro (*c*). Cuando una textura se reduce a tamaño subatómico, el campo de Higgs se reconecta y elimina el defecto.

quida es muy simétrica: parece la misma mirada desde cualquier ángulo. El hielo es menos simétrico que el agua; consta de una estructura cristalina determinada, que sólo parece la misma si se desplaza ciertas distancias discretas o se gira unos ángulos discretos.

Cuando el agua se congela repentinamente, no forma un cristal perfecto; está poblado de imperfecciones. El origen de esos defectos hay que atribuirlo a los cristales de hielo que se desarrollan por doquier en cuanto el agua empieza a congelarse. Cada cristal crece en una orientación aleatoria, hasta que se encuentra con otros y llenan, todos, el espacio disponible; y se producen imperfecciones o irregularidades en la estructura cristalina allí donde coinciden regiones de orientación dispar. Cuanto más deprisa se enfría el líquido, más defectos se forman, por la sencilla razón de que los cristales disponen de menos tiempo para crecer antes de encontrarse unos con otros. Un proceso similar pudo haberse dado cuando el universo, acabado de nacer, se enfrió rápidamente y sufrió transiciones de fase de rotura de simetría.

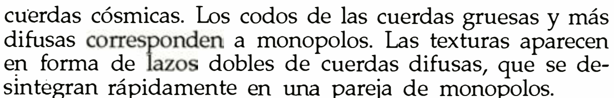
Las transiciones de fase que preocupan en física de partículas difieren, de las observadas en el agua, en dos aspectos importantes: defectos y disposición de los componentes. En el hielo, los defectos persisten firmemente en su lugar en virtud de la estructura cristalina; por contra, los defectos predichos en teoría de partículas se mueven con libertad, y, así, en cuanto se forman, empiezan a desenredarse y a rectificarse para reducir al mínimo su energía. Este fenómeno de dinámica de ordenación de defectos se ha estudiado en cristales líquidos y otros materiales.

Veamos el segundo aspecto. La fase del agua se define por la disposición de sus moléculas constituyentes; en el dominio de la física subatómica, la fase de las distintas partículas y fuerzas viene determinada por el estado de los campos que

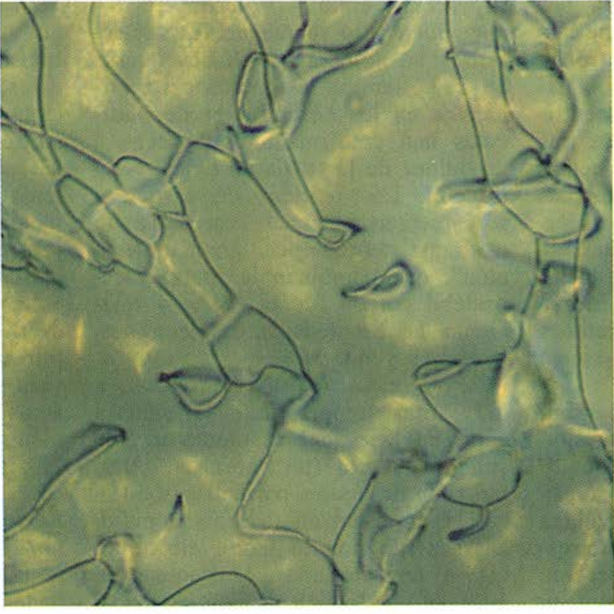
Cristales líquidos

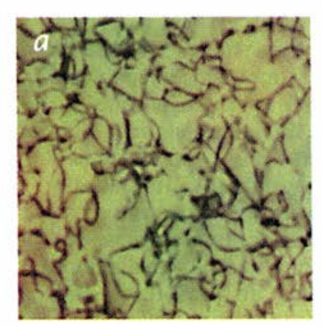
Los cristales líquidos constituyen un ejemplo idóneo para estudiar la formación y evolución de defectos que pudieron acontecer en el universo primitivo. Los defectos en los cristales líquidos aparecen en líneas y lazos oscuros (*arriba*). Los cristales líquidos que se muestran aquí constan de moléculas orgánicas en forma de varillas. A altas temperaturas, las moléculas están orientadas al azar, creando una fase isotrópica, de simetría entera. A bajas temperaturas, las moléculas se disponen en una fase alineada, de simetría rota. Los defectos aparecen donde coinciden regiones de distinta orientación molecular.

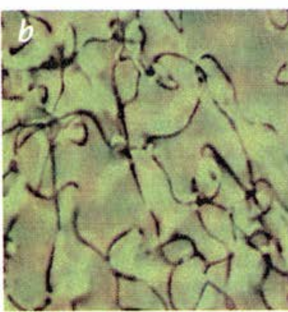
Bernard Yurke y sus colaboradores, de los Laboratorios Bell, han observado, de acuerdo con lo esperado, que las transiciones de fase rápidas en los cristales líquidos provocan un barullo apretado de defectos. Esta sustancia, sencilla por lo demás, admite tres de las cuatro clases de defectos. Otros sistemas de laboratorio, tales como los superconductores o las aleaciones binarias, sólo forman una clase de defectos (cuerdas o paredes de dominio, respectivamente). Las líneas oscuras y delgadas que se ven aquí nos remiten a las


cuerdas cósmicas. Los codos de las cuerdas gruesas y más difusas corresponden a monopolos. Las texturas aparecen en forma de lazos dobles de cuerdas difusas, que se desintegran rápidamente en una pareja de monopolos.

La evolución subsiguiente de los defectos en los cristales líquidos (*fila inferior*) ilustra bellamente la idea del escalado, que es central en las teorías de defectos del origen de la estructura cósmica. Las fotografías muestran el cristal un segundo (*a*), 1,7 segundos (*b*), 2,9 segundos (*c*) y 4,8 segundos (*d*) después de la transición de fase. El patrón de los defectos se mantiene siempre, en un sentido estadístico; crece, sin embargo, la escala de las estructuras. En el cristal líquido, la escala de las estructuras crece en proporción a la raíz cuadrada del tiempo transcurrido; la escala de los defectos cósmicos, por contra, crecería linealmente con el tiempo. De cualquier manera, los defectos de las transiciones de fase, pequeños en su inicio, desembocan en estructuras de magnitud creciente. Si los defectos topológicos en el universo primitivo instaron la agregación de la materia, podrían haber producido el patrón de distribución de galaxias actual.











las ponen en relación. Cada partícula y cada fuerza del modelo estándar de la física lleva asociado un campo correspondiente. Además de los campos eléctrico y magnético que nos son familiares, existe el campo del electrón, el campo del protón, etc.

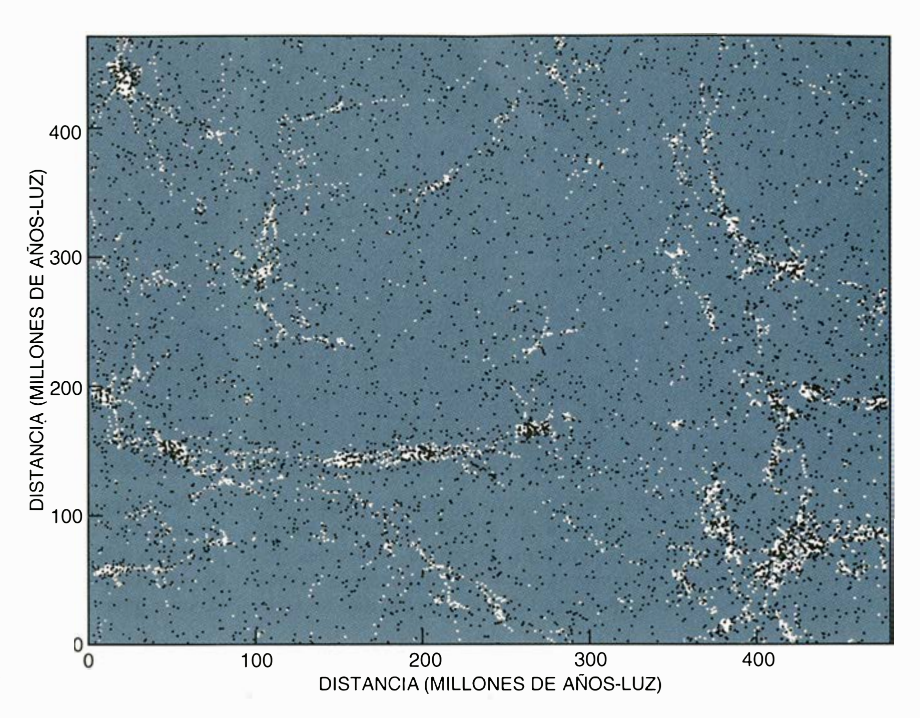
Los físicos de partículas han establecido campos hipotéticos, conocidos por campos de Higgs, con el propósito expreso de romper la simetría entre las fuerzas y partículas. Los campos de Higgs satisfacen ecuaciones de movimiento parecidas a las que gobiernan los campos eléctricos y magnéticos. Al igual que éstos, los campos de Higgs tienden a minimizar su energía mediante la asunción de una intensidad uniforme en todo el espacio.

Mas, a diferencia de otros campos, el de Higgs no se anula en su estado de mínima energía. Antes bien, toma una intensidad determinada y no nula en todo el universo. Al hacerlo, el campo de Higgs rompe la simetría entre las fuerzas y las partículas que se acoplan a él. Los físicos de partículas han empleado este mecanismo de Higgs en las teorías electrodébil, de gran unificación, de campo de familias y de supersimetría. En cada caso se introducen campos de Higgs adicionales para romper la simetría. Por ejemplo, cuando las temperaturas caen por debajo de la transición de fase electrodébil, se conecta el campo de Higgs electrodébil y se rompe la simetría entre el electrón y el neutrino y entre las fuerzas débil y electromagnética.

Aunque hay indicios claros de que se produce algún tipo de rotura de simetría, los campos de Higgs siguen instalados en el terreno de la hipótesis. Los teóricos sólo recurren a ellos para romper la simetría, y la única indicación de su existencia es que, en efecto, las simetrías están rotas.

Entre los objetivos prioritarios de la próxima generación de aceleradores se cuenta el de buscar la partícula de Higgs, que debe de estar asociada al campo de Higgs electrodébil. El descubrimiento de dicha partícula constituiría uno de los hitos reseñables de la historia de la física: en la teoría electrodébil, el mecanismo de Higgs es el responsable de dar la masa a todas las partículas conocidas.

El mecanismo de Higgs no es el único proceso capaz de romper la simetría entre fuerzas y partículas; sí es el más sencillo y el que mejor conocemos. Muchas de las consecuencias de la rotura de simetría aquí consideradas son ciertas en líneas generales y no dependen de las particularidades del mecanismo de Higgs.



3. SIMULACION DE LA ESTRUCTURA GENERAL de un cosmos perturbado por texturas. Se parece bastante a la realidad observada. A medida que se van desplegando las texturas, aumenta su densidad de energía y se intensifican sus perturbaciones gravitatorias. En la imagen, la materia visible (*blanco*) se agrega de forma mucho más prieta que la materia oscura (*negro*). Si este hallazgo posee validez en el universo real, entonces los astrónomos puede haber subestimado significativamente la cantidad de materia oscura existente en el cosmos.

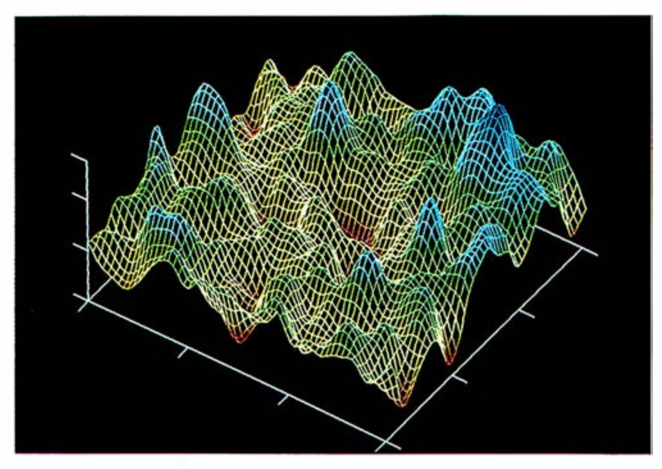
La comparación con el hielo nos ilustra de qué modo podría el campo de Higgs producir texturas y, a través de ellas, la estructura general del cosmos. A la manera del hielo, que consta de planos cristalinos dotados de orientaciones definidas, el campo de Higgs puede representarse como si tomara determinadas direcciones. Un campo magnético rompe la simetría del espacio indicándole a la aguja qué dirección señalar, y primando, pues, una dirección sobre todas las demás. El campo de Higgs indica una dirección en un sentido similar, aunque más abstracto. Por ejemplo, la dirección del campo de Higgs electrodébil rompe la simetría del "espacio" electrón/neutrino. La "dirección" en que apunta adquiere masa y se convierte en el electrón.

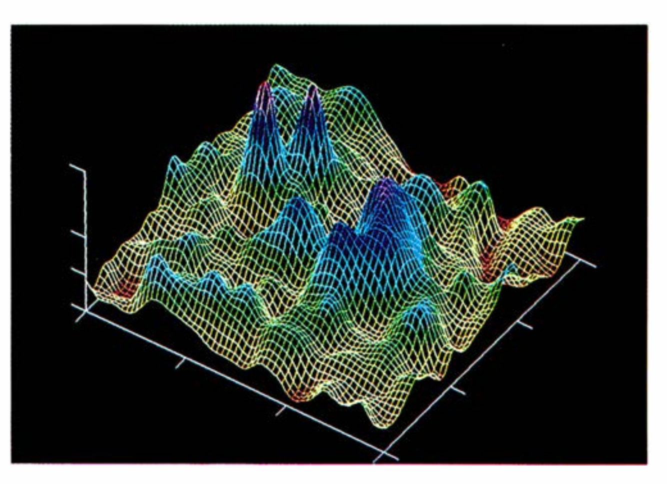
En 1976, Thomas W. B. Kibble, del Imperial College de Londres, elaboró la doctrina. Señaló que las transiciones de fase que rompen la simetría poco después de la gran explosión podrían haber provocado que el campo de Higgs tomara distintas direcciones en diferentes regiones del universo, igual que ocurre con las diversas regiones cristalinas de un bloque de hielo. Kibble observó que, en muchas teorías unificadas, se formarían defectos del campo de Higgs allí donde se encontraran regiones con orientaciones del campo en conflicto.

Tales regiones no pueden desplegar una configuración uniforme. Por el contrario, se forma una intensa concentración de energía local: un defecto topológico. Esas irregularidades atrajeron la atención de los cosmólogos, ya que podían almacenar ingentes cantidades de energía, manteniendo a grandes rasgos las condiciones del universo primitivo. En razón de la equivalencia entre energía y masa, estos defectos producen efectos gravitatorios que harían que la materia se agregara. Los teóricos han realizado, pues, un esfuerzo considerable estudiando los defectos topológicos e intentando descubrir si encerraban la clave de la estructura general del universo.

Las teorías de partículas admiten la existencia de cuatro clases distintas de defectos topológicos. Cada uno de ellos ha sido objeto de investigación para determinar si produjo la estructura cósmica.

El defecto topológico más sencillo, denominado paredes de dominio, surge cuando se rompe una simetría discreta (por ejemplo, una reflexión especular). Las regiones del espacio





4. FLUCTUACIONES DE DENSIDAD: pueden seguir distribuciones aleatorias (gaussianas) o no aleatorias. La teoría de la inflación predice fluctuaciones de densidad aleatorias (*izquierda*). Los modelos de texturas predicen picos más intensos y valles más hondos en la densidad (*derecha*). En ambos escenarios, la gravedad es la responsable del colapso, de las regiones densas, en galaxias. Los modelos de texturas producen algunas regiones particularmente densas que colapsarían muy pronto, lo que justificaría las observaciones recientes de cuásares y galaxias viejísimos.

donde el campo de Higgs toma valores distintos estarían separadas por superficies en las que éste cambia de un valor a otro. Estas superficies de paredes de dominio no pueden tener márgenes, sino que deben formar burbujas cerradas u hojas infinitas. Por desgracia, las paredes de dominio desempeñan un pobre papel en la siembra de estructura cósmica. Almacenan tanta energía que, si se hubieran formado al poco de la gran explosión, habrían dominado rápidamente la masa del universo, dejando escasa materia para la generación de estrellas, planetas o seres vivos.

Las simetrías continuas ocupan, en cosmología y en teorías unificadas de partículas, un lugar más preeminente que el atribuido a las simetrías discretas. En ese contexto, el campo de Higgs puede apuntar en un conjunto continuo de direcciones. Una clase de defecto de simetría continua tiene forma de línea. Para entender cómo surgiría ese defecto, imagínese el lector inmerso en la muchedumbre. Cuando mira a su alrededor, el gentío parece el mismo en todas las direcciones; en otras palabras, la simetría direccional no está rota. Si se le ordena a la multitud que se tire al suelo, cada uno lo hará en una dirección propia, por lo que al principio habría mucha confusión, pero poco a poco la gente se adaptaría para situarse en la misma dirección que sus vecinos. Por tanto, vería que la gente de su entorno permanece en una dirección determinada. Se ha roto la simetría direccional.

Si todos se estiran radialmente a partir de usted, se verá obligado a estar de pie: el lector representa un defecto en la fase de simetría rota. Un defecto de esta clase, en el que el campo de Higgs apunta radialmente hacia afuera, se denomina cuerda cósmica. Muchas teorías de gran unificación predicen la existencia de cuerdas cósmicas. Estas forman líneas a través del espacio que no tienen extremos. Se configuran en bucles cerrados o en líneas infinitas que vagan por el universo; en los cristales líquidos se observan fenómenos parecidos.

En 1979 el físico soviético Yakov B. Zel'dovich sugirió que las cuerdas cósmicas ofrecían un mecanismo plausible para la creación de estructura cósmica. Durante la década siguiente, los teóricos consagraron no pocos esfuerzos al conocimiento de sus propiedades. Sin embargo, Andreas Albrecht y Albert Stebbins, del Fermilab, acaban de demostrar que las cuerdas cósmicas y la materia oscura fría producirían estructura a una escala muy pequeña comparada con la agregación general que se demuestra en los análisis de las galaxias.

Si los defectos lineales no pueden hacer este trabajo, ¿qué pasa con los puntuales? Tales defectos topológicos surgen cuando las direcciones locales del campo de Higgs apuntan radialmente hacia afuera en tres dimensiones, desde un punto. Esos monopolos, así se llaman los defectos, recuerdan las púas erizadas de un puercoespín asustado. Cierta clase de monopolo, que aparece en muchas teorías de gran unificación, constituye un auténtico problema porque, lo mismo que las paredes de dominio, tiende a dominar sobre la materia restante del universo. Se sigue investigando en otras clases de monopolos cuyas propiedades se acoplen mejor a la naturaleza de las texturas.

En 1989, uno de nosotros (Turok) observó que muchas teorías de gran unificación producían otra variedad de defecto topológico, la textura, capaz de iniciar la formación de la estructura general, al par que evitaba las obvias limitaciones de otras clases de defectos. Cuesta mucho más representar una textura que los otros defectos: se debe a un campo de Higgs que apunta en cuatro dimensiones, disposición que no podemos dibujar sobre papel, aunque sí podemos representar un corte bidimensional de la misma.

Las texturas serían mucho más difusas que las paredes, las cuerdas y los monopolos. Una textura no se localiza ni en un punto, ni en una línea, ni en una superficie. Las texturas carecen de tamaño preferido; pueden ocupar milímetros o años-luz. Una vez formada, la textura evoluciona contrayéndose a la velocidad de la luz hasta un tamaño subatómico, en cuyo momento el campo de Higgs se desenreda y se reconecta en una configuración regular. Junto con William H. Press y Barbara S. Ryden, de la Universidad de Harvard, hemos realizado simulaciones numéricas con ordenador de la formación y evolución de las texturas en el universo primitivo. Nos dicen las simulaciones que las texturas presentan un sencillo comportamiento de escala como el mostrado por los defectos de cuerdas en los cristales líquidos. En ambos casos, los defectos dibujan un patrón que siempre parece el mismo (en un sentido estadístico), aunque en él cambia la

escala con el tiempo. En el caso de las texturas cosmológicas, la escala crece a la velocidad de la luz. Este comportamiento parece ser el necesario para engendrar la morfología de la estructura del cosmos observada.

La transición de fase que crea las texturas acontece a la temperatura de gran unificación, poco después de la gran explosión. En aquel tiempo se formaron texturas de todos los tamaños. Se fueron desplegando de acuerdo con un tamaño creciente; al cabo de una hora de la gran explosión, se desenvolvían las texturas que poseían ya la talla de una hora-luz; al año, llegó el turno a las que medían un año-luz, y así sucesivamente. En el universo actual habría texturas de miles de millones de años-luz en proceso de contracción.

A medida que una textura se va contrayendo, su energía se concentra en una región que se encoge sin cesar. Esa concentración produce un campo gravitatorio que atrae la materia de los alrededores. Cada textura deja tras de sí un pico en la distribución de masa del universo. Se forman picos de magnitud creciente conforme se van contrayendo y desplegando texturas cada vez mayores. Cuando el universo quedó dominado por la materia, unos 10.000 años después de la gran explosión, estos picos empezaron a crecer por su propia gravedad. La amplia gama de tallas que ofrecen las texturas resulta en pareja variedad de escalas de objetos ligados por la fuerza de la gravedad, desde cúmulos estelares hasta galaxias, cúmulos galácticos y supercúmulos gigantes.

La densidad de energía del campo de textura determina cuán intensamente atrae a la materia circundante; está fijada por la intensidad del campo de Higgs, magnitud que se halla, a su vez, definida por la escala de energía involucrada en el proceso de la rotura de la simetría en el que se forma la textura. Por no disponer de teoría vertebrada para producir las texturas, hemos ajustado la intensidad del campo de Higgs para lograr el mejor encaje en la estructura observada del universo. Al hacerlo, descubrimos que nuestra teoría predice que la rotura de la simetría debe tener lugar a una temperatura próxima a la temperatura de gran unificación, una coincidencia sugestiva.

A lo largo de los últimos diez años, se han desarrollado modelos de ordenador muy refinados que permiten estudiar la acumulación por acción de la gravedad en un universo en expansión. Los últimos modelos introducen incluso efectos hidrodinámicos: formación de choques, radiación y enfriamiento. Debido en parte a los rápidos avances en el soporte físico y el lógico de los ordenadores, hemos logrado, en el último par de años, convertir nuestra vaga hipótesis de las texturas en una teoría predictiva y detallada de la formación de la estructura cósmica.

El modelo de perturbación con texturas que mejor se ajusta a los datos observacionales contiene el 95 por ciento de la masa en forma de materia oscura fría; el resto es materia ordinaria.

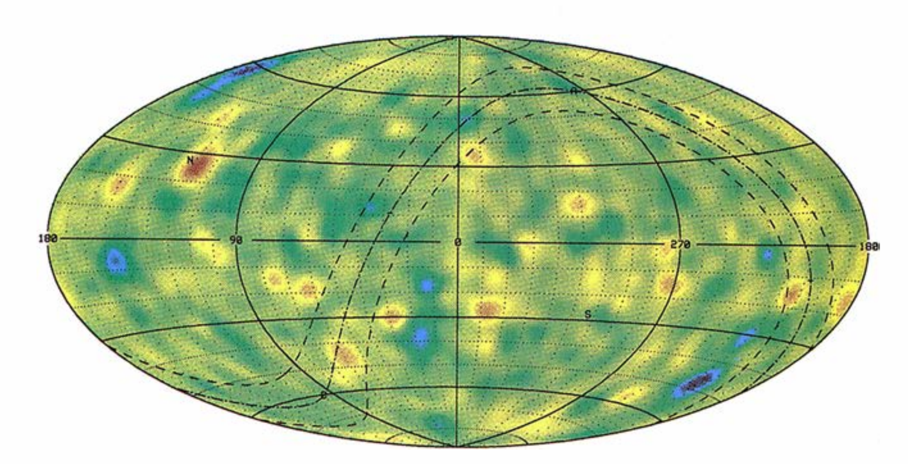
Exito de la teoría de la inflación más la materia oscura fría fue su acuerdo cuantitativo con la acumulación observada de las galaxias a escalas menores que la separación media de las galaxias. En colaboración con Changbom Park, del Instituto de Tecnología de California, realizamos minuciosos cálculos numéricos con ordenador de la acumulación gravitatoria producida por las texturas. Y encontramos que éstas, junto con el modelo de la materia oscura fría, se mostraban coherentes con la agregación galáctica observada.

No debe sorprendernos, en el fondo, esa coherencia aproximada de las predicciones de las dos teorías a escalas menores que la separación media entre las galaxias. En dichos intervalos, la gravedad es la fuerza dominante en los patrones de agregación de materia, eliminando las diferencias entre las teorías en liza. Se necesitan, y nadie lo duda, mediciones más precisas de la estructura a escalas mayores, en las que la gravedad no ha alterado apreciablemente el patrón de acumulación originaria, para resolver el acierto de los modelos de formación de estructuras.

A esas escalas mayores, la función de correlación angular de las galaxias (es decir, su acumulación manifiesta en el cielo) constituye la mejor estadística disponible. Según se indicó antes, la correlación observada entra en conflicto con la predicha por la inflación a grandes escalas angulares. Las simulaciones que hemos realizado con Park, combinadas con estudios analíticos abordados con Andrew Gooding y J. Richard Gott III, de la Universidad de Princeton, ponen de relieve que la función de correlación angular predicha por la teoría de las texturas se ajusta mucho mejor a las observaciones.

Entre la teoría de la inflación y la de las texturas media otra diferencia importante. En el modelo inflacionario, las fluctuaciones de densidad en el universo primitivo siguen una distribución aleatoria (gaussiana); los modelos de texturas, sin embargo, producen fluctuaciones de densidad en forma de picos confinados que tienen propiedades estadísticas muy distintas. En particular, los picos de alta densidad abundan mucho más en la teoría de las texturas que en la de la inflación.

En virtud de esa cuantía de regiones densas, la formación de galaxias empieza mucho antes en la teoría de las texturas que en los escenarios de inflación. En los últimos, los objetos del tamaño de una galaxia no comienzan su colapso hasta que el universo ha cumplido miles de millones de años; en un universo perturbado por texturas, la formación de galaxias empieza transcurridos apenas una decena de millones de años. Esta conclusión reviste particular significación a la luz de recientes descubrimientos de varios cuásares cuya



5. SIMULACION DEL FONDO DE MICROONDAS para poner de manifiesto regiones del cielo de microondas "calientes" (*azul*) y "frías" (*rojo*) predichas por el modelo de texturas. Estas variaciones podrían verse confirmadas en los datos del satélite *COBE*, ahora en estudio.

luz queda muy desplazada hacia el rojo, señal de que ya brillaban cuando el universo sólo tenía aproximadamente mil millones de años. La existencia de tales cuásares sugiere que algunos objetos ligados por acción de la gravedad surgieron muy poco después de la gran explosión.

Si consideramos grandes distancias, las intensas fluctuaciones de densidad producidas por las texturas provocarían la aparición de cúmulos y supercúmulos más densos que lo predicho por la hipótesis de la inflación. Gooding y Jim Bartlett, de la Universidad de California en Berkeley, han llegado al descubrimiento de que los cúmulos de galaxias se forman antes y adquieren mayor densidad en la teoría de las texturas que en el modelo inflacionario. Las mediciones de las densidades de los cúmulos cercanos constituirán una prueba significativa para el modelo de texturas. El reciente análisis a gran escala dirigido por George Efstathiou, de la Universidad de Oxford, revela la existencia de algunos supercúmulos galácticos de cientos de millones de años-luz, talla que guarda coherencia con lo predicho por la teoría de las texturas y está en desacuerdo con la teoría de la inflación.

Hemos trabajado con Renyue Cen y Jeremiah P. Ostriker, de Princeton, en la preparación de modelos informáticos refinados de la generación de galaxias en las texturas. Y llegamos a la comprobación de que éstas, unidas a la materia oscura fría, conducen al desarrollo de objetos colapsados cuyas propiedades se parecen mucho a las de las galaxias reales; así, el número predicho de galaxias de cualquier masa dada se ajusta a las observaciones dentro de la incertidumbre computacional del modelo.

Una vez que hubimos identificado, en la simulación, dónde se originaban las galaxias, nos aprestamos a examinar su distribución global. Resulta interesante destacar que las galaxias se agregan de modo mucho más prieto que la materia oscura. ¿Dónde reside la importancia de ello? Los astrónomos han venido admitiendo que las galaxias seguían, a grandes rasgos, la misma distribución que la materia oscura. Basadas en ese postulado, las mediciones de las masas de los cúmulos conducían inalterablemente a estimaciones de que la densidad del universo era la décima parte de la densidad crítica necesaria para detener su proceso de expansión.

Ahora bien, si las galaxias se agrupan de manera más apiñada que lo hace la materia oscura, estas determinaciones sólo habrían medido una fracción de la materia oscura y habrían subestimado gravemente la densidad del universo. La teoría de las texturas sugiere que la materia oscura restante, que representa la mayor parte de la masa del universo, se distribuye con mayor homogeneidad. Nuestras simulaciones muestran grandes láminas de galaxias en torno a regiones casi vacías, parecidas en tamaño y en forma a la "gran muralla" y a los vacíos encontrados en el exhaustivo rastreo galáctico dirigido por Margaret J. Geller y John P. Huchra, del Centro Astrofísico Smithsoniano de Harvard. No nos aparecen macroestructuras que superen los 300 millones de años-luz, predicción que habrán de comprobar varios equipos que están cartografiando la distribución de galaxias y cuásares a muy grandes escalas.

Por fin, a medida que las texturas se van desplegando deberán dejar una señal distintiva en el fondo cósmico de microondas. Los fotones que, en su viaje hacia nuestro planeta, encontraran una textura en repliegue podrían, o bien perder energía subiéndose a una textura que se contrae, o bien ganar energía cayendo en una textura en despliegue. Las texturas han de conducir a un patrón distintivo de unos 10 puntos "calientes" y "fríos" del firmamento de microondas, cada uno dotado de un tamaño aproximado de 10 grados de arco y de una temperatura que se desvía de la media en una parte en 10.000. Tales fluctuaciones deberán detectarlas los mapas del cielo de microondas que están levantando el *COBE*, detectores a bordo de globos y equipos instalados en el polo Sur. Estamos a la espera de sus resultados.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

THE EARLY UNIVERSE. Edward Kolb y Michael Turner. Addison-Wesley Publishing, 1990.

THE CASE FOR THE RELATIVISTIC HOT BIG BANG COSMOLOGY. P. J. E. Peebles, D. N. Schramm, E. L. Turner y R. G. Kron en *Nature*, vol. 352, n.º 6338, págs. 769-776; 29 de agosto de 1991.

GLOBAL TEXTURE AS THE ORIGIN OF COSMIC STRUCTURE. Neil Turok en *Proceedings of Nobel Symposium n.º 79: The Birth and Early Evolution of Our Universe*. Dirigido por J. S. Nilsson, B. Gustafsson y B.-S. Skagerstam. World Scientific/Physica Scripta, 1991.

A HYDRODYNAMIC APPROACH TO COSMOLOGY: TEXTURE-SEEDED CDM AND HDM COSMOGONIES. R. Y. Cen, J. P. Ostriker, D. N. Spergel y N. Turok en *Astrophysical Journal*, vol. 383, n.º 1, págs. 1-18, 10 de diciembre de 1991.

John Horgan

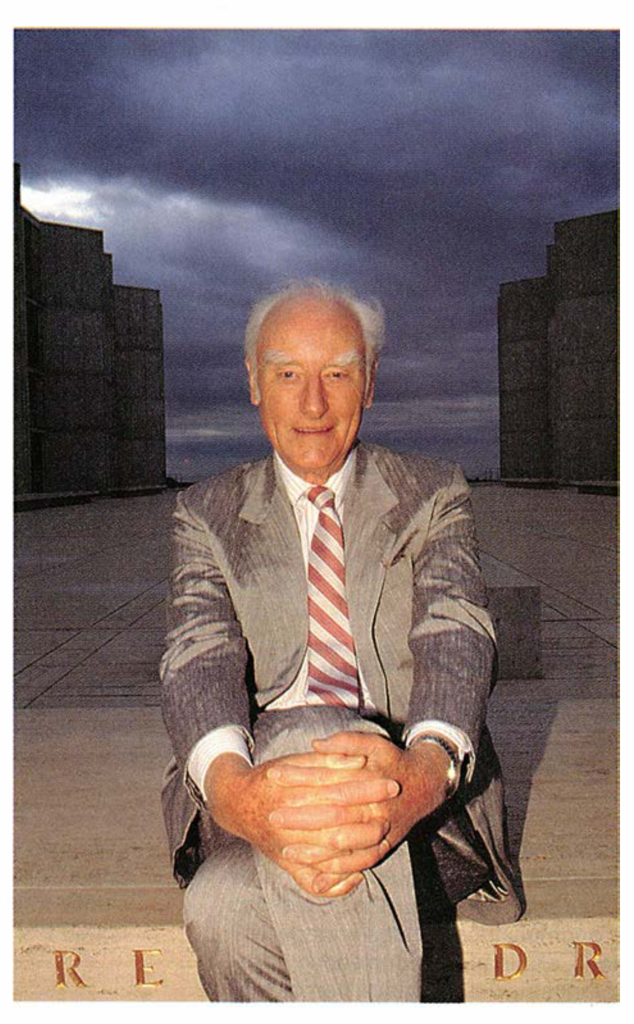
FRANCIS H. C. CRICK: *Mefistófeles de la neurobiología*

Hay algo de halo esotérico en Francis Harry Compton Crick. Sus ojos son alargados; su boca se curva en las comisuras. Unos y otra dibujan una mueca perpetua y malvada. Sus pobladas cejas se proyectan hacia fuera cual cuernos incipientes. Su cara rubicunda se ilumina aún más cuando se ríe, cosa que hace frecuentemente y con ganas. Crick disfruta cuando dinamita algún producto mental difuso, como mi vana esperanza de que los hombres tengamos una voluntad libre.

Hasta un acto de la simpleza de la visión, señala Crick con su acento inglés, requiere de hecho una enorme computación neuronal. "Lo mismo podría decirse de la manera en que se realiza un movimiento, por ejemplo, el de coger un bolígrafo", continúa, tomando uno de su mesa y moviéndolo ante mí. "Una gran cantidad de computación prepara ese movimiento. Somos conscientes de la decisión tomada, pero no del proceso que le induce a uno a tomarla. Puede parecerle libre, pero es el resultado de cosas de las que uno no es consciente."

El discurso de Crick —y su semblante mefistofélico— cuadran con su pensar, el de uno de los reduccionistas más radicales. Este biólogo teórico de 75 años debe su fama a haber descubierto con James D. Watson en 1953 la estructura en doble hélice del ácido desoxirribonucleico, el ADN, la clave molecular para entender la caja negra de la herencia genética. Con menos espectáculo, Crick siguió adelante para mostrar de qué manera está cifrada la información genética en el ADN. También ha hecho incursiones en la biología del desarrollo y en el origen de la vida.

Durante los últimos 16 años, sin embargo, desde que cambió la Universidad de Cambridge, en Inglaterra, por el Instituto Salk de Estudios Biológicos en La Jolla (California), Crick se ha dedicado con ahínco a la más negra de todas las cajas: el cerebro. Tiene el firme propósito de desvelar su maquinaria en el misterio de la consciencia, un aspecto del cerebro que a su parecer ha sido injustamente ladeado por los neurobiólogos. "Este campo es un poco conservador", dice Crick. "No se topa uno con nada que pueda considerarse excitante. Hay que sacarlo a la fuerza."



Francis Crick confía en desentrañar los fenómenos que se esconden tras la consciencia. (Fotografía de James Aronovsky.)

Su arrogancia es legendaria. "Nunca he visto a Francis Crick comportarse con modestia", es el chascarrillo con que Watson comienza sus recuerdos del famoso descubrimiento en *The Double Helix*. Crick da a entender que si a veces se muestra presuntuoso no es más que porque quiere llegar a toda costa al fondo de la cuestión. "Puedo ser paciente durante 20 minutos, pero ni uno más."

Crick abrazó pronto el materialismo. Nacido en 1916 en Northampton (Inglaterra), en el seno de una familia protestante de clase media, abandonó las prácticas religiosas a los 12 años y se convirtió en "un agnóstico con reparos ante el ateísmo". Su carrera en biología tardó en florecer. Estudió física en el University College de Londres y durante la segunda guerra mundial diseñó minas para el ejército británico.

Acabada la contienda, decidió pasarse a la biología y entró en el laboratorio de Cambridge dedicado a la investigación de la estructura de moléculas orgánicas por la difracción que sufren los rayos X al atravesarlas. Al cabo de poco tiempo, despotricaba del método de difracción de rayos X empleado y proponía vías alternativas. Sus colegas, tras sobreponerse del enojo ("Crick, te la estás jugando", le espetó Sir Lawrence Bragg, el eminente director del laboratorio de Cambridge, cuando escuchó de soslayo una de sus críticas mordaces), se dieron cuenta de que el impetuoso doctorando estaba en lo cierto y adoptaron sus sugerencias.

Cuando él y Watson descubrieron la estructura del ADN, Crick había cumplido los 37 años y todavía le faltaba un año para defender su tesis de doctorado en física. Contrariamente a lo que sugiere la mayoría de los relatos, apostilla, fueron muy pocos los científicos que reconocieron en seguida el interés del hallazgo. Watson y él no recibieron el premio Nobel (junto con Maurice H. F. Wilkins, que les

proporcionó datos de rayos X) hasta 1962.

Para entonces, Crick y otros habían demostrado la codifición de los aminoácidos por el ADN. En 1961, y a propósito de una de sus rarísimas visitas al laboratorio (aunque se confiesa "un experimental en lo más hondo del corazón", se ha limitado siempre a interpretar o predecir los resultados de otros), demostró que un "triplete" de bases del ADN constituye el código de un aminoácido. Algunas de sus propuestas han tardado más tiempo en confirmarse. El pasado mes de octubre se publicaba en la revista *Science* que cierta clase de proteínas —presentes en músculos, pelo y huesos, y relacionadas con el cáncer y la regulación génica— tiene la estructura que nuestro hombre pergeñara en su tesis doctoral.

A finales de los sesenta, Crick se pasó de la genética a la biología del desarrollo, que estudia la maravillosa transformación de un racimo de células en una mariposa, un cachalote o un taxista. Ocupado en esto, ha observado más o menos como espectador —y con asombro— cómo durante los años setenta los investigadores inventaban poderosas técnicas para manipular genes. A la pregunta de si piensa que la humanidad debería usar de ese conocimiento para mejorar su estructura genética, responde: "Casi se podría decir que es una obligación."

Pero primero, añade, la gente debería depurar sus maneras de pensar. "Una de las cosas más terribles del mundo occidental, y de este país en particular, es el número de gente que cree en cosas científicamente falsas. Si alguien me dice que la Tierra tiene menos de 10.000 años, en mi opinión debería visitar un psiquiatra."

Algunos científicos dijeron lo mismo de Crick en 1981 tras la aparición de *Life Itself*, un libro sobre el origen de la vida, que ha escrito con Leslie E. Orgel, del Instituto Salk. El libro proponía que las semillas de la vida fueron enviadas a la Tierra en una nave espacial lanzada por seres de otro planeta. Denominada panspermia dirigida, la teoría se recibió con rechifla en medios bioquímicos y astrofísicos, por lo que el propio Orgel hubo de defenderse alegando que se trataba de "una broma". Pero Crick insiste en que, dada la debilidad de todas las teorías de la biogénesis terrestre, la panspermia dirigida aún debería ser considerada como "una posibilidad seria".

Crick no se muerde la lengua ante los enfoques del cerebro que le parecen desencaminados. Ha clamado contra la "perniciosa influencia" del modelo del ordenador. Los ordenadores están diseñados según preceptos lógicos y matemáticos, hace notar, mientras que la selección natural remienda a los organismos con "trucos y mecanismos", con cualquier cosa que funcione. Contempla con similar escepticismo algunos aspectos de las redes neuronales, ordenadores que procesan y almacenan la información en paralelo en varios sitios; en particular, ha vertido su crítica acerada contra un modelo de red neuronal del cerebro llamado "darwinismo neuronal". Propuesto por el biólogo de la Universidad de Rockfeller Gerald M. Edelman, sostiene que la mente queda caracterizada por la competición entre grupos de neuronas que corresponden a diferentes memorias.

Crick ha acusado públicamente a Edelman de esconder ideas no excesivamente originales tras una "jerga a modo de pantalla de humo". (Es público que a Edelman, que a imagen de Crick posee un premio Nobel y pareja egolatría, no le han parecido constructivas esas críticas.) El de Salk cree, sin embargo, que la investigación en redes neuronales puede ser fructífera. En 1983 señaló, con Graeme Mitchison, que, cuando se sobrecarga de datos a los modelos por ordenador de redes neuronales, forjan a veces "pseudomemorias", que son de hecho productos de las reales. Los investigadores sugirieron que el cerebro bien pudiera emplear deliberadamente un mecanismo durante el sueño para reducir su sobrecarga de memoria. El resultado: pseudomemorias llamadas sueños.

El grueso de los esfuerzos de Crick en la neurobiología se ha centrado en averiguar la naturaleza de la consciencia. Había decidido ahondar en el conocimiento visual como punto de arranque, habida cuenta de la tradición investigadora en ese dominio. El opina, sin embargo, que todas las formas de consciencia —ya involucren percepción sensorial, emoción o pensamiento abstracto— surgen del mismo mecanismo fundamental, uno que combina la atención y la memoria reciente.

En el fenómeno de la atención hay algo más que el simple procesado de la información. Para demostrar este extremo, Crick pone sobre la mesa el ejemplo clásico de las dos caras enfrentadas, o dos copas, según se mire. Aunque el estímulo visual sobre el cerebro permanece inalterado, señala, lo que uno percibe —o a lo que uno le presta atención (cara o copa)— cambia continuamente. ¿Qué cambio en el cerebro corresponde a este cambio de atención?

Crick y Christof Koch, neurobiólogo del Instituto de Tecnología de California, ofrecieron en 1990 una respuesta en *Seminars in the Neurosciences*. Se apoyaron en cierto trabajo de dos grupos alemanes, en el que se ponía de manifiesto que, cuando los gatos perciben una escena, algunas neuronas de su corteza visual se disparan con extrema celeridad, a unas 40 veces por segundo. Esas neuronas oscilantes, sugerían Crick y Koch, corresponden a aspectos de la escena a los que se presta atención. Si uno se imagina el conjunto de neuronas estimuladas por una determinada escena como una vasta multitud rumorosa, las neuronas oscilantes son un grupo que de pronto empiezan a susurrar en el mismo tono. Volviendo al ejemplo de la silueta de la copa, primero susurra el conjunto de neuronas correspondiente a la copa; luego el conjunto vuelve a murmurar al azar conforme las correspondientes a los perfiles rompen a hablar.

Pero no parece que Crick las tenga todas consigo. Los alemanes observaron las oscilaciones en gatos parcialmente anestesiados. Los experimentos realizados con animales en vigilia no han detectado oscilaciones en las regiones que esperaban Crick y Koch. No se desanima. Recuerda que, antes de descifrar la doble hélice, él y Watson dieron muchos palos de ciego. "La investigación de exploración es realmente como trabajar en la niebla. Se va a tientas. Luego la gente vuelve la vista atrás y piensa cuán derechamente se caminaba."

Admite incluso que pueda haber límites al grado de precisión con el que los científicos conozcan la mente. Para él, que el cerebro sea un sistema determinista no implica que sea totalmente predecible; la teoría del caos ha demostrado que ocurre así con muchos sistemas complejos. Puede resultar que la consciencia involucre procesos que, al igual que la física cuántica, sean paradójicos y extremadamente difíciles de entender. Apela, además, a los "qualia", un término usado por los filósofos para designar aspectos de la percepción, por ejemplo el color, que en cierto sentido son cognoscibles de forma meramente subjetiva. Se trata, sin embargo, de rendijas ilusorias del materialismo a ultranza de Crick.

Ciencia y sociedad

Agujeros negros

El sistema V404 Cyg

La conceptualización teórica de los agujeros negros constituye un importante capítulo de la astrofísica que se inicia a finales del siglo XVIII, con los estudios de Michell y Laplace sobre la desviación de las partículas de luz por la acción gravitatoria de estrellas muy masivas. A lo largo del presente siglo, la teoría de los agujeros negros ha experimentado un considerable avance gracias a la irrupción de la Teoría General de la Relatividad de Einstein y al trabajo posterior de Schwarzschild, Oppenheimer y Snyder, Kerr, Wheeler y Hawking, entre otros.

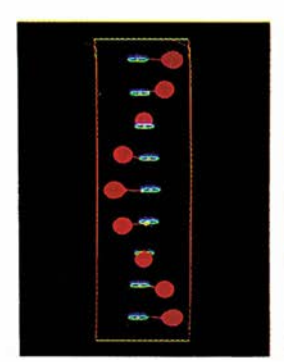
No obstante, la demostración empírica de su existencia ha resultado siempre esquiva debido, por un lado, a la incomunicación absoluta con el resto del universo (*desconexión causal*), impuesta por el *horizonte de sucesos*; y debido, por otro, a la ausencia de propiedades o rasgos específicos observables, a excepción de la terna masa, carga y momento angular; como diría Wheeler, "los agujeros negros no tienen pelo".

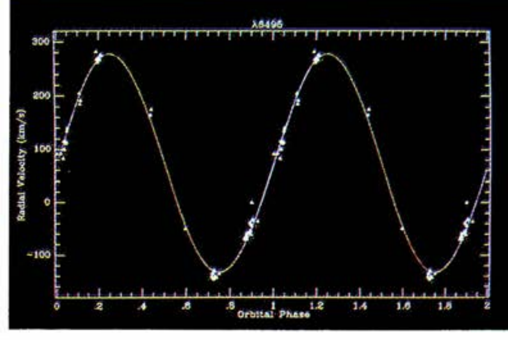
De hecho, distinguir entre una estrella de neutrones típica (1,4 masas solares), poco magnetizada, y un agujero negro de unas 10 masas solares es extraordinariamente difícil, dada la similitud de sus radios y pozos de potencial. Además, los períodos correspondientes a las últimas órbitas estables de ambos astros coinciden. De todos modos, y a pesar de las desalentadoras predicciones que ofrece la teoría, se han destinado numerosos esfuerzos a la observación de propiedades que, por sí mismas, puedan presentarse como signos inequívocos de la existencia de los agujeros negros. Este trabajo se ha nutrido especialmente del estudio de los mecanismos de acreción en los sistemas binarios de rayos X, donde la caída de materia sobre el objeto compacto provoca la liberación, en forma de rayos X, de toda la energía gravitatoria acumulada.

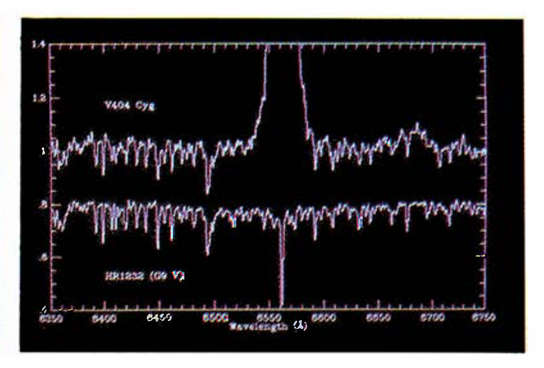
El comportamiento espectral del sistema Cygnus X-1, candidato a agujero negro desde 1972, se ha utilizado a menudo de botón de muestra en la búsqueda de nuevos candidatos potenciales. En 1971, Oda y otros detectaron variabilidad rápida o *parpadeo* en la intensidad de los rayos X, con una escala de tiempo característica entre 1 milisegundo y 1 segundo. Este fenómeno se atribuye a la circulación de materia en órbitas muy próximas al objeto compacto. Sin embargo, dicha característica se ha observado también en los sistemas V0332+53 y Cir X-1, cuya clasificación como estrellas de neutrones se considera hoy en día probada tras la detección de pulsos de rayos X y brotes eruptivos, respectivamente.

Otra de las propiedades de Cyg X-1 más citadas es el *comportamiento bimodal* de los rayos X blandos. En los llamados estados altos, en los que la emisión en rayos X es más intensa, el flujo es considerablemente mayor a energías menores (*espectro ultrablando*). En cambio, para los estados bajos, la distribución global del flujo es mucho más suave. Para interpretar esa transformación espectral se acude a las variaciones del ritmo de acreción sobre el objeto compacto. Tanto la distribución espectral de cada estado, en sí misma, como la evolución temporal entre ambos se suponen indicadoras de la presencia de agujeros negros. No obstante, existen también casos, como el propio Cir X-1, que aun mostrando tales comportamientos terminan confirmándose como sistemas de estrellas de neutrones, cuestionando la fiabilidad de dichos diagnósticos.

El descubrimiento de nuevos sistemas de rayos X a finales de los ochenta (por ejemplo, GS2000+25 y GS2023+338) permitió identificar nuevas peculiaridades susceptibles de convertirse en futuros indicadores. Entre ellas cabe citar la ausencia de *oscilaciones cuasiperiódicas* (periódicas durante un cierto intervalo de tiempo) y la *variabilidad caótica* de intensidad durante la erupción. Todo el conjunto de propiedades espectrales y temporales de la emisión en rayos X mencionado hasta ahora parece estar relacionado más con la física de los procesos de acreción que con la naturaleza del objeto compacto subyacente. Hemos de considerarlas, pues, como criterios indirectos de preselección, aunque no conduzcan a ningún resultado concluyente.







EVOLUCION ORBITAL de un sistema binario de rayos X típico (izquierda). *La estrella compañera se encuentra deformada por la intensa atracción gravitatoria que ejerce sobre ella el objeto compacto. Un chorro de gas cae sobre este último, formando una estructura estacionaria conocida por disco de acreción. En el centro, curva de velocidad radial de la compañera óptica del sistema V404 Cyg, relativa al sistema de referencia de la estrella patrón 61 Cyg A. En ella se ilustra el desplazamiento Doppler experimentado por los rasgos espectrales a medida que la estrella se acerca o se aleja de nosotros en su movimiento orbital. A la derecha, espectro promedio de V404 Cyg obtenido tras corregir cada uno de los espectros individuales del desplazamiento Doppler indicado en la figura anterior. A modo de comparación mostramos el espectro de una estrella de tipo espectral G9V.*

Por otro lado, la medición de las masas implicadas en los sistemas binarios constituye un engranaje fundamental de la astronomía del siglo XX. La *función de masas* es una ecuación que expresa las masas del objeto compacto (M_x), de la estrella compañera (M_c) y la inclinación (i) en función de dos observables: el período orbital (P) y la semiamplitud de velocidad radial (K). Una vez detectado el espectro de la componente óptica, a través del desplazamiento Doppler de sus líneas estimamos P y K. Para determinar M_x necesitamos conocer M_c e i o, al menos, acotarlos en la medida de lo posible. El primero de ellos suele inferirse a partir de la observación del tipo espectral, mientras que el segundo puede ser estimado sólo de forma aproximada, recurriendo a la presencia o ausencia de eclipses en rayos X, fundamentalmente. Un límite inferior para M_x surge de adoptar las condiciones más extremas o desfavorables, es decir, despreciar la masa de la estrella compañera (M_c=0), por un lado, y suponer que observamos el sistema con la máxima inclinación posible (i=90º), por otro. De acuerdo con las teorías 'clásicas' de la materia degenerada, sabemos que las estrellas de neutrones dejan de ser estables para masas superiores a 3 masas solares. Por tanto, la masa del objeto compacto, obtenida a partir del estudio dinámico de la estrella compañera, se convierte en el único ensayo convincente de la presencia de un agujero negro.

Aplicando la herramienta anterior, Cyg X-1 y AO620-00 se erigen en los dos candidatos a agujero negro más sólidos hasta la fecha. Sus funciones de masa establecen límites inferiores para las masas de los objetos compactos de 3,4 masas solares. Estos sistemas han sido, hasta hace poco, los únicos que rebasan el valor crítico de 3 masas solares, si bien la proximidad de sus valores obliga a mantener ciertas reservas acerca de su clasificación definitiva como agujeros negros.

A finales de mayo de 1989, *Ginga*, satélite japonés de rayos X, descubrió una nueva fuente de rayos X en la constelación del Cisne. Catalogada como GS2023+338, no tardó en identificarse con la variable V404 Cyg, conocida a través de una erupción registrada en el año 1938. A partir de la intensa emisión en rayos X y de la violenta y errática variabilidad exhibida, Tanaka propuso que se trataba de un nuevo candidato a agujero negro. En verano de 1991, el sistema había retornado al estado de quietud y presentaba, por vez primera, la oportunidad de aislar a la débil estrella compañera. El equipo formado por Phil Charles (Observatorio de Greenwich y Universidad de Oxford), Tim Naylor (Universidad de Keele) y el autor, haciendo uso de la potencia del telescopio de 4,2 m William Herschel y de las excelentes condiciones atmosféricas reinantes, consiguió detectar ciertos rasgos espectrales atribuibles a la compañera óptica. Usando técnicas de correlación, pudimos estudiar el desplazamiento orbital de las líneas de absorción con respecto al sistema de referencia de una estrella patrón de tipo espectral parecido. Del posterior análisis de períodos y del estudio de otros valores se infirió una masa mínima para el objeto compacto de 6,3 masas solares. Esta cantidad sobrepasa con mucho el límite de estabilidad teórico atribuido a una estrella de neutrones, y se constituye en el candidato a agujero negro más importante encontrado hasta el momento.

Podemos obtener una estimación más ajustada de la masa del objeto compacto acotando las variables M_c e i. Si suponemos que la estrella compañera no está muy perturbada por la influencia del agujero negro, podemos asignarle una masa correspondiente al tipo espectral observado (G9V), es decir, M_c=0,9 masas solares. Por otro lado, la ausencia de eclipses de rayos X sugiere i=80º. Combinando ambas restricciones obtenemos para el objeto compacto una masa superior a 8.

El hecho de que V404 Cyg se convierta en la primera comprobación experimental de la existencia de los agujeros negros depende, en última instancia, de nuestro conocimiento sobre la ecuación de estado que describe la materia a alta densidad. A partir de la ecuación de estado 'clásica' para estrellas de neutrones, el teorema de Rhoades-Ruffini sitúa el límite de estabilidad en 3,2 masas solares. Bahcall y colaboradores han propuesto recientemente una ecuación de estado distinta que, sin embargo, resulta compatible con las observaciones de física nuclear y los modelos de física de partículas. Con la nueva ecuación de estado podemos construir modelos de estrellas de neutrones con densidades típicas de enanas blancas y masas notablemente superiores a 3. Estos objetos, bautizados con el nombre de *estrellas Q*, posiblemente adolezcan de los intensos campos magnéticos que caracterizan a las estrellas de neutrones. La última palabra sobre este asunto la tienen los especialistas en física de partículas, quienes podrán establecer, a través de la experimentación, qué ecuación de estado se ajusta mejor al comportamiento de la materia degenerada. Mientras tanto, podemos afirmar que el objeto compacto del sistema V404 Cyg no es una estrella de neutrones 'clásica', confirmándose como el candidato a agujero negro más sólido de nuestra galaxia y un punto de referencia obligado en el estudio de nuevos sistemas de rayos X. (J. Casares, del Instituto de Astrofísica de Canarias.)

Receptores

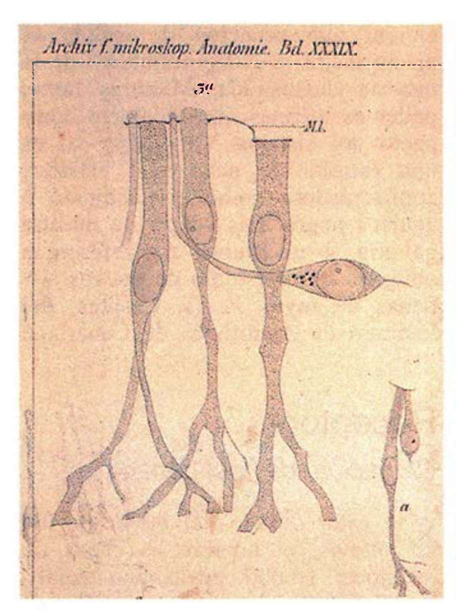
Clonación de los genes

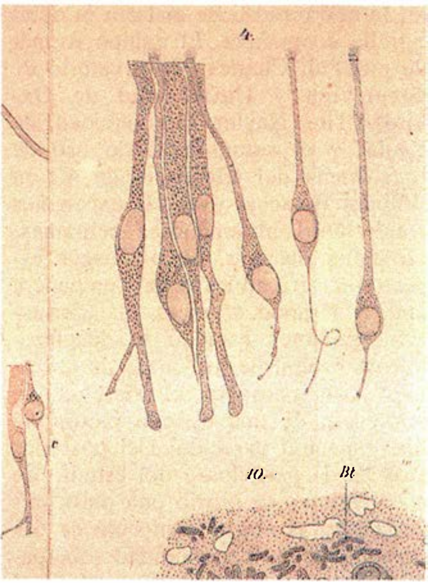
Sin estar dotado del mejor de los olfatos, el hombre es capaz de reconocer 10.000 substancias volátiles distintas. Llega incluso a discriminar entre pequeñas modificaciones moleculares de estructura.

En el siglo primero antes de Cristo, el poeta y filósofo romano Lucrecio dejaba escrito en su *De rerum natura* que el olor era un objeto "compuesto de átomos grandes" y que su diferente percepción obedecía a sus "formas diversas". Pero las moléculas encargadas de reconocer dichas formas, los receptores, se resistían a la identificación. (Aunque por receptores se entiende a veces las células del sentido del olfato, aquí nos ceñiremos a las antenas moleculares.)

La eficacia del olfato reside en su propia versatilidad, pues no se circunscribe a sustancias naturales, sino que percibe el olor despedido por nuevos compuestos sintéticos. Se evidencia así la existencia de un sistema flexible para el reconocimiento de estructuras moleculares, no limitado a sustancias condicionadas por la evolución. De las posibilidades del reconocimiento químico tenemos otro ejemplo válido en el sistema inmune, cuyas células producen nuevos anticuerpos y receptores específicos para substancias extrañas, merced a la combinación adecuada de material genético.

Las secuencias génicas esperadas para los receptores de los olores deben atenerse a tres criterios, aseveran Linda Buck y Richard Axel, del Instituto Howard Hughes de la Universidad de Columbia. En primer lugar, deben iniciarse en células del epitelio olfativo, es decir, leerse en forma de ARN mensajero. En segundo lugar, las proteínas sintetizadas a partir de esa codificación deben pertenecer a una clase general de moléculas de receptores de membrana, cuya señal se transmite a las proteínas-G; esos receptores se caracterizan por un elemento estructural típico: su cadena





LAS FIBRILLAS SENSIBLES de las células del olfato fueron descritas en 1880 por Albert von Brunn en Rostock. En la figura las presenta en forma de finas pestañas en el ápice celular, acompañadas de células de sostén.

aminoacídica serpentea por la membrana celular en una y otra dirección, cruzándola siete veces. Por último, y en justa correspondencia con la diversidad proteínica, los receptores de los olores deben venir determinados por una superfamilia de genes emparentados.

De acuerdo con ese triple criterio, Buck y Axel acometieron su propia estrategia experimental. Introdujeron fragmentos cortos "conservados" (es decir, que se han mantenido inalterables o casi a lo largo de la evolución) de genes de los receptores, por parejas y a modo de sonda para identificar, dentro de un conjunto de ARN mensajeros de epitelio olfativo de rata, los correctos. Las zonas marcadas por la sonda se multiplicaron mediante la técnica de la reacción en cadena de la polimerasa. Se obtuvieron fragmentos de distinta longitud, todos ellos copiados varias veces. Destacaba un tipo muy variable, según era de esperar en una familia amplia de genes. Los fragmentos menos variables procederían de otros genes de receptores proteicos.

Los genes identificados cumplían las tres condiciones mencionadas. Su estructura parecía más sencilla que la de los genes del sistema inmune y no se apreciaron intrones (fragmentos sin expresar). La razón de esa pluralidad no es homóloga a la del sistema inmune, donde un repertorio restringido de subunidades distintas se combinan de formas siempre nuevas para dar lugar a genes funcionales; los genes de los receptores olfativos permanecen inalterados durante el desarrollo del individuo.

Las investigaciones avanzan ya que la superfamilia podría abarcar un mínimo de 100 genes diferentes y, con ello, otros tantos receptores proteicos. Se habla de la división en subfamilias, con receptores muy similares; por lo que se presume que cada subfamilia se ocuparía de un sector específico de sustancias olorosas y, dentro de la misma, los receptores emparentados darían cuenta de los matices.

Experimentos recientes con anticuerpos contra los productos de los nuevos genes demuestran que sus proteínas se hallan en la superficie de las células del epitelio. Gracias a los anticuerpos podremos conocer muy pronto de qué modo movilizan las células implicadas su repertorio génico. Cabría esperar que cada célula reconociese sólo un olor y transmitiera luego esa información: se hallaría entonces activado un solo gen de receptor proteico por célula y, en cada tipo de célula, uno distinto. No sabemos todavía de qué forma se produce esa expresión diferenciada durante el desarrollo del epitelio olfativo.

La percepción del olfato es más eficaz que la mostrada por el sentido de la vista. Con tres receptores distintos, apenas podemos discriminar entre escasos centenares de matices cromáticos. El principio básico del reconocimiento de los olores por los receptores ahora descubiertos se remonta muy atrás en la evolución. Lo vemos en vertebrados inferiores e incluso en invertebrados. La identificación de los genes de la percepción olfativa permite seguir la cadena informativa desde la molécula volátil percibida en la nariz hasta su reconocimiento en el cerebro. (Axel Brennicke, director del Instituto de Investigación Biogenética de Berlín.)

Sociobiología

Selección de parentesco

Un experimento reciente con un animal caníbal ha prestado respaldo a la teoría de la selección de parentesco, una extensión de la selección natural de Darwin. Cuando a los renacuajos del sapo *Scaphiopus* se les da de comer presas animales enteras, éstos se desarrollan en una forma especializada que devora a los miembros de su propia especie. Pero suelen evitar comerse a sus parientes próximos.

La hipótesis de la selección de grupo fue propuesta en los primeros años sesenta por el evolucionista británico William D. Hamilton. Afirmaba que la selección natural prima los genes que hacen que los animales se comporten de forma más altruista con sus parientes próximos que con otros individuos sin relación familiar. El auxilio a los parientes favorece el que los genes se extiendan por la población porque es probable que los parientes próximos sean portadores de copias de los mismos genes.

La teoría de Hamilton, que él expresó matemáticamente, constituye uno de los pernos de la sociobiología. Estimuló la investigación de la conducta animal para con los parientes. No tardó en "corroborarse" ese comportamiento privilegiado con los animales del mismo tronco familiar. Así, muchos animales prefieren encontrarse cerca de sus parientes, a diferencia de lo que ocurre con los individuos a los que no les unía ningún lazo familiar.

Alan Grafen, biólogo teórico de la Universidad de Oxford, se muestra más exigente. A su entender, algunas pretendidas pruebas de selección de parentesco no eran más que demostraciones de la tendencia de ciertos animales a asociarse con otros que huelen como ellos, fenómeno que pudo haberse desarrollado por varias razones distintas. De la mera asociación no podemos inferir una selección de parentesco, apostillaba.

Los trabajos de David P. Pfennig, de la Universidad de Cornell, con los renacuajos caníbales resiste la crítica de Grafen y respalda la hipótesis de la selección de parentesco; en aplicación de ésta se habrían atemperado sus apetitos. Los renacuajos de *Scaphiopus* que no se alimentan con una dieta de animales enteros, se tornan

omnívoros y no devoran a miembros de su propia especie. La forma omnívora, como otros muchos animales, prefiere asociarse con individuos emparentados. Los carnívoros, en cambio, prefieren asociarse con animales con los que no guardan relación de parentesco. Cuando tienen hambre, se agitan en el agua y "mordisquean" los renacuajos con los que se topen. El renacuajo no emparentado que tenga la mala fortuna de ser mordisqueado posee grandes probabilidades de ser comido, pero si se trata de un hermano se le suele dejar en paz.

Para Pfennig, los carnívoros se sirven de claves químicas en el reconocimiento de los parientes. Puesto que su preferencia para comer a los no emparentados y asociarse con ellos está en contra de la preferencia de la forma omnívora, no obstante su similaridad genética, la selección de parentesco se nos ofrece como la explicación más probable.

¿Por qué razón, entonces, no abunda más el canibalismo? Aunque la selección de parentesco podría impedir la evolución de animales que se comen a sus parientes próximos, esa estrategia selectiva favorecería el consumo de individuos débiles y domeñables, no emparentados. Pfennig aporta su propia respuesta: en estudios de larvas de salamandras tigre, encontró que los individuos que se dedicaban al canibalismo tenían más probabilidades de morir por culpa de bacterias patógenas y gusanos parásitos. Este riesgo, sugiere, constituye un motivo suficiente para descartar la práctica.



RENACUAJOS de Scaphiopus

Pintura ártica

El hombre y la ballena

La región continental e insular, inmensa, que se extiende más allá del círculo polar ártico, fascina al viajero por su carácter desértico y grandioso. Pero en ella hay zonas que vienen siendo habitadas desde tiempo inmemorial, desde mucho antes de que el vikingo Erick el Rojo, en el siglo X, emprendiera la colonización de Groenlandia: en Alaska, el primer vestigio conocido de presencia humana se remonta unos 15.000 años; durante el tercer mile-



ESTE ANTROPOMORFO, pintado sobre una vértebra de ballena, ha sido descubierto en la isla Victoria; data del siglo XIV o XV de nuestra era y corresponde al período Thule.

nio antes de nuestra era, el Artico canadiense estuvo poblado de cazadores que provenían de las costas americanas del estrecho de Bering, y, hasta mediados del primer milenio de nuestra era, varias oleadas de cazadores continuaron aquella colonización yendo siempre del Oeste al Este, del estrecho de Bering hacia Groenlandia.

Estos cazadores árticos pertenecían a dos grandes tradiciones culturales cuyos nexos y afinidades siguen permaneciendo borrosos. Por un lado, entre el 2500 de antes de nuestra era y el 1000 de nuestra era, la mayoría de ellos cazaba grandes piezas terrestres (como el buey almizclero y el caribú), vivía en grupos reducidos y fabricaba pequeños utensilios; algunas de sus esculturas atestiguan una rica inspiración religiosa. Por otro lado, hacia el año 1800 antes de nuestra era, algunos grupos alaskeños dominaron la navegación en mar abierto y aprendieron a cazar ballenas y otros grandes mamíferos marinos. La abundante nutrición de que así disponían incrementó su desarrollo demográfico; además, las cacerías de ballenas, cuyo éxito dependía de la cohesión de los equipos, implicaron una estructuración social: por aquella época aparecieron las primeras aldeas árticas.

A partir del siglo X de nuestra era, estos cazadores de cetáceos se fueron expandiendo por toda la región ártica, diseminando así una cultura bastante parecida a la de los esquimales de hoy: la cultura "de Thule", que debe su nombre al de la base más septentrional de Groenlandia, de donde partió en 1921 una expedición danesa en busca de sus vestigios.

Los 'thulenses' (o pueblos que pertenecieron a la cultura de Thule) parece ser que emigraron con ocasión de un aumento general del calor que, allá por el siglo X, debilitó los bancos de hielo y disminuyó la duración anual de las heladas, modificando con ello la ruta migratoria de las ballenas: éstas, que solían recorrer antes el mar de los tchuktchis (al norte del estrecho de Bering), pasaron al de Groenlandia a través de los canales del archipiélago ártico canadiense, llevando tras de sí a sus cazadores.

La cultura de Thule del este del archipiélago ártico canadiense era ya bien conocida; se ignoraba, en cambio, casi todo de las islas situadas al oeste y en el centro del archipiélago, que se hallaban igualmente en la ruta migratoria de los thulenses. Para cubrir esta laguna, un equipo de arqueólogos de la MIAFAR (Mission archéologique française de l'Arctique), dirigido por Jean-François Le Mouël y trabajando en asociación con investigadores canadienses, ha explorado la isla Victoria y la Tierra de Banks, al oeste del archipiélago ártico canadiense.

En la isla Victoria, los arqueólogos han excavado un poblado thulense de la costa occidental que estaba muy amenazado por el pillaje, pues desde 1974 los inuit [plural de 'inuk', individuo perteneciente a cualquiera de las tribus de esquimales orientales] vendían los vestigios de sus ancestros a los prospectores petroleros de estas regiones árticas. El poblado, situado a la orilla del mar, constaba de diez habitáculos y allí se han encontrado también tumbas, escondrijos para guardar alimentos y algunas trampas para cazar zorros. Las casas, de planta atrebolada, tenían un ámbito central flanqueado por dos divertículos, uno que servía de cocina y otro de depósito del material de caza; un largo corredor de entrada, que se abría de cara al mar y descendía hacia el exterior, hacía de regulador térmico —dejando abajo estancado el aire frío y aprisionando arriba, en el interior, el aire caliente. Los objetos descubiertos en estas casas se hallan bastante bien conservados debido a la conjunción de tres factores: el suelo quedó aislado del medio ambiente por los derruidos muros; los restos animales acumulados han neutralizado el suelo ácido y creado un entorno básico conservador; en fin, el suelo ártico, permanentemente helado, ha impedido la putrefacción.

Analizando el estilo de las cabezas de arpón descubiertas en este poblado, Maryke Le Mouël ha demostrado que sus fabricantes pertenecían al período clásico de la cultura thulenses, hacia los siglos XIV y XV. Este período se distingue de los demás pe-

ríodos de Thule por dos aspectos: mientras que la mayoría de los thulenses se alimentaban de ballenas, el 90% de la alimentación de los habitantes de la isla Victoria lo constituían las focas; además, mientras el armazón de las casas thulenses estaba generalmente formado por costillas y mandíbulas de ballenas, el de las casas de la isla Victoria era de maderas recogidas a flote (lo mismo que algunas cabezas de arpón, varios juguetes infantiles y diversos recipientes descubiertos en estas casas). Como en la isla no crece ningún árbol, dedúcese de tal madera, procedente de zonas subárticas, fue arrastrada por los grandes ríos norteamericanos y siberianos hasta el océano Artico y transportada después por las corrientes marinas hasta la isla Victoria.

En una de estas casas, los arqueólogos han descubierto la más antigua pintura ártica que se conoce: una figura humana pintada con gruesos trazos esquemáticos sobre una vértebra de ballena. Este icono apareció sobre el suelo de la pieza principal, adosado a la pared del norte, en el eje del corredor de entrada. Habría sido trazado entre los años 1380 y 1450 de nuestra era, según el análisis estilístico de las cabezas de arpón y la datación por el carbono 14 de los restos óseos que ocupaban el mismo estrato. Los pigmentos de la pintura, analizados por Bernard Guineau, en Orléans, están constituidos de negro de carbono obtenido por calcinación de materias orgánicas (huesos o grasas).

El soporte óseo, estudiado por Lucien Jourdan, en el Museo del Hombre de París, es una vértebra torácica de ballena, de 23 cm de longitud, 18 cm de anchura y 1,8 cm de espesor; el artista le dio forma elíptica eliminando las dos apófisis vertebrales. Dado que no se ven en el hueso indicios de desgaste por el agua del mar ni tampoco de ningún arrancamiento, los investigadores suponen que procedería de algún viejo esqueleto varado en tierra.

La figura humana está representada de pie, con los brazos y las piernas extendidos separadamente; el artista no ha reproducido ni los pies ni las manos del antropomorfo y no se percibe ningún detalle del rostro ni de vestimenta alguna. En cambio, se han aprovechado bien varias características anatómicas de la vértebra: poniendo el brazo y la pierna izquierdos en la zona periférica y rugosa del hueso, el artista ha logrado una especie de esfumadura que sugiere que el hombre va a echar a correr. Los tres surcos anatómicos de la vértebra, que prolongan el brazo derecho del antropomorfo en el centro del disco vertebral, representarían un arco invertido y una flecha. Curiosamente, esta pintura se parece más a los grabados de los esquimales del pasado siglo que a los grabados y a las esculturas del período de Thule.

El hallazgo de esta obra demuestra que, aunque la ballena dejó de servir de alimento y de proporcionar materiales para la construcción de las casas, conservó un importante carácter simbólico para los habitantes de la isla Victoria.

Inteligencia artificial

Neuronas de silicio

Según el neuroanatomista Rodney Douglas, de la Universidad de Oxford, es verosímil que el año próximo por estas fechas alguno de sus posgraduados se apreste a estudiar los impulsos nerviosos de una mosca de silicio. Tal vez otros estén fisgando en las complejidades nerviosas de las hormigas electrónicas, en "cortes tomográficos" silíceos de la corteza visual de los mamíferos o en otras vías de procesado biológico de información.

El entusiasmo de Douglas se debe a una neurona monopastilla que logró, hace unos meses, poner a punto en colaboración con Misha Mahowald, del Instituto de Tecnología de California. Las neuronas artificiales constituyen un componente esencial de las redes neuronales, redes en las cuales están los investigadores esforzándose en duplicar sobre silicio la estructura y función de las células nerviosas. La meta principal que los diseños de redes neuronales ambicionan ha venido siendo la creación de computadoras capaces de remedar el pensamiento humano, pero también están convirtiéndose en modelos importantes de procesos biológicos. Douglas afirma que el nuevo dispositivo aporta un alto grado de verosimilitud a las simulaciones nerviosas, porque emula el flujo de iones de calcio y potasio que provoca la activación o desactivación de las células.

Hasta ahora —continúa Douglas— los investigadores han tenido que fiar en simulaciones computarizadas de neuronas, lo que exige una programación onerosa, amén de ordenadores grandes y rápidos. Y aun así se tiene la impresión de que los resultados siguen estando "ligeramente desviados" de la realidad, estima Douglas. La versión en silicio, que debería resultar más rápida y más económica que la simulación por programa, proporciona la impresión de estar trabajando con células vivas, llegando incluso a exhibir algo del ruido, aleatoriedad y variabilidad que presentan las neuronas reales. Por otra parte, los experimentadores pueden variar las propiedades de la neurona de silicio para mejor ajustarlas a tipos concretos de células nerviosas. Por ejemplo, es posible ajustar los parámetros correspondientes a la permeabilidad de la membrana para diferentes iones, al objeto de que reflejen las diferencias de potencial y las corrientes eléctricas de células específicas.

Hasta ahora, todas las tentativas de recreación en silicio de axones y sinapsis han sufrido tropiezos. Resulta difícil, por ejemplo, interconectar un número importante de neuronas. Si se instalan en el microcircuito conductores largos necesarios para duplicar los axones, las señales se atenúan o distorsionan. Las diferencias en la fabricación de los microcircuitos pueden provocar que el nivel de tensión eléctrica "signifique" una cosa en uno e indique otra diferente en otro.

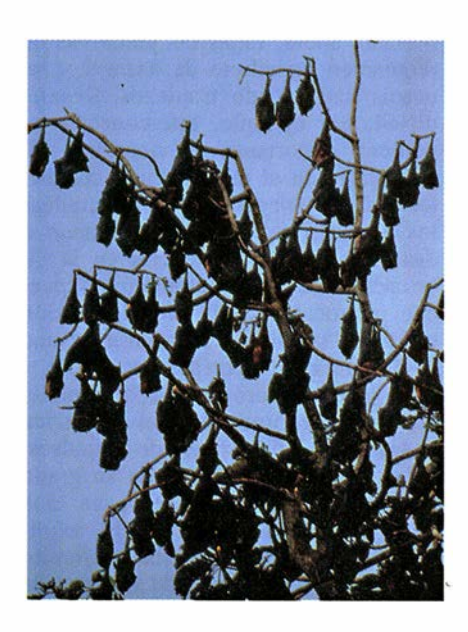
La nueva neurona, por otra parte, no produce una tensión eléctrica constante, sino un tren de impulsos, cuya frecuencia depende de su grado de actividad. "Una cresta es una cresta", suele decir Mahowald, explicando enseguida que hasta el circuito más sencillo es capaz de detectar la presencia o ausencia de ella. Las neuronas están interconectadas por un bus de alta velocidad, de forma que cuando una neurona genera un pico impulsional de potencial eléctrico, lo que hace es enviar un destello a todas las demás, informándolas de su dirección. Toda neurona que tenga en una de sus entradas a la neurona activada reconoce la dirección y modifica, a resultas, su nivel de activación. Este sistema debería permitir a los experimentadores interconectar entre sí centenares e incluso miles de neuronas ubicadas en docenas de microcircuitos, afirma Douglas. Además, los circuitos de direccionamiento de cada neurona son programables, lo que permite modificar el plan de interconexiones sin desmontar el cableado.

Douglas pronostica que los microcircuitos basados en la pastilla neuronal tendrán amplia aplicación en inteligencia artificial (para construir sistemas autónomos sencillos) y en neuroanatomía (para estudiar las funciones cerebrales). El circuito permite la comprobación directa de teorías de función e interconexión neuronal, lujo del que "no es habitual dispongan los neurocientíficos", añade. "Uno cree que entiende las cosas", comenta, pero las cuestiones interesantes se plantean cuando "las ves funcionar en el mundo."

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Murciélagos de día

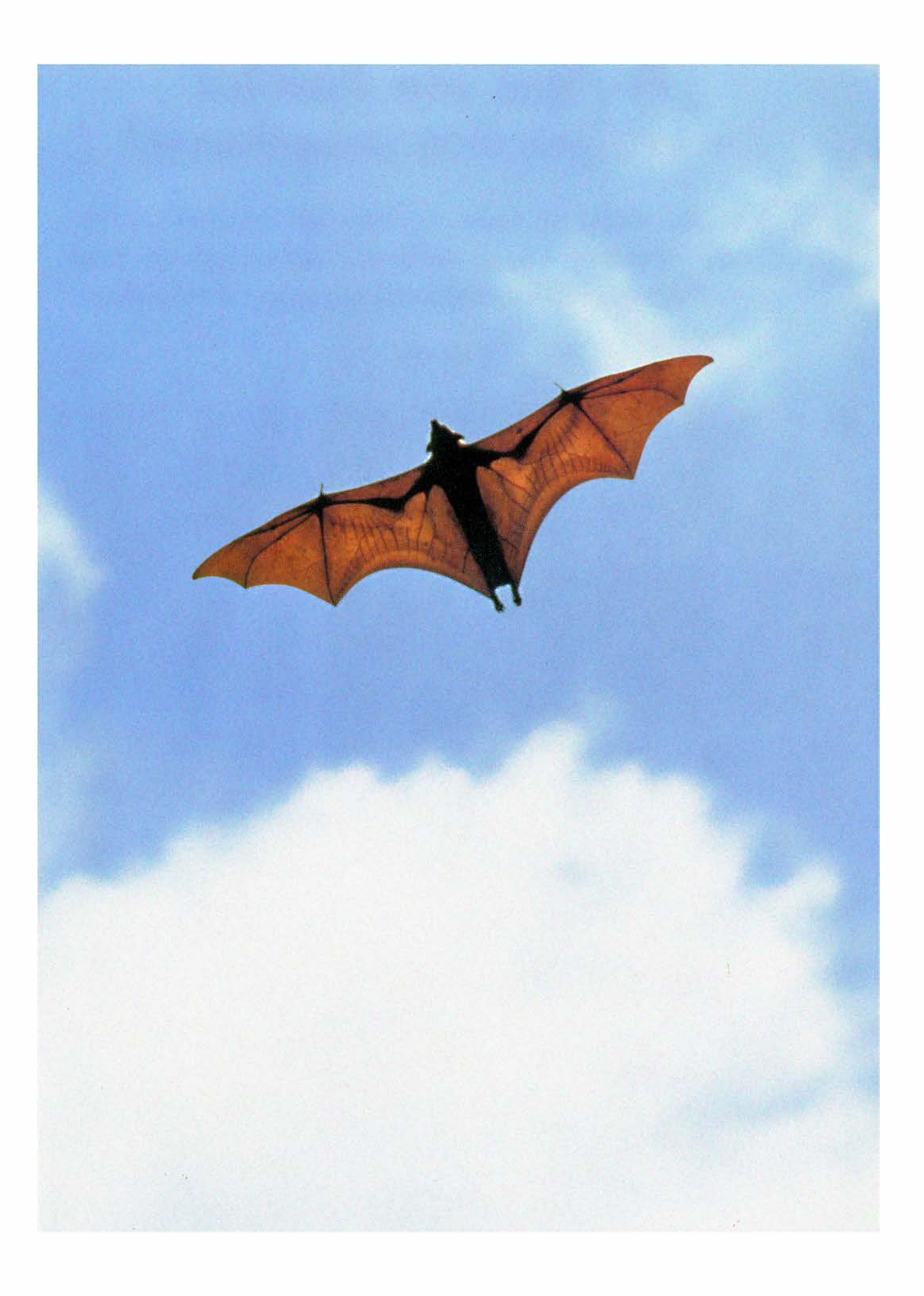


Como en botica, en la naturaleza suele haber de todo. Especies que se adaptan a distintos hábitats, modificando, si para ello es necesario, su talla. De todos los murciélagos, los mayores se inscriben en el género *Pteropus*, algunos de los cuales rozan el medio metro de longitud corporal con una envergadura alar de metro y medio. Poseen la cabeza oblonga, los ojos grandes y prominentes, la nariz chata y las orejas simples, estrechas y acuminadas; las hembras tienen las mamas cerca de las axilas.

Amantes de la vida social, se reúnen en la copa de un árbol robusto, suspendidos con las uñas de sus extremidades posteriores en las ramas desnudas. Causan bastante daño en las plantaciones y en los árboles frutales, su dieta preferida. Por su ferocidad aparente, los nativos indonesios les aplicaban calificativos que han persistido: murciélago zorro, murciélago perro salvaje y otros. Se distinguen por sus caninos, largos y erectos, en surco y formando una meseta semicircular en la base.

En ocasiones se muestran activos incluso de día, como ocurrió con el que fotografié. Serían las diez de la mañana. La estampa de sus alas membranosas, cuya transparencia dejaba ver el armazón óseo, resultaba inquietante y desafiadora en mi cielo nipón de un azul nítido. Preparé la máquina manteniendo una exposición más clara que lo habitual, para captar mejor la envergadura del mamífero volador. Eso explica que el firmamento no resplandezca con la intensidad que le caracteriza.

Foto de la derecha
distancia focal: 300 mm
diafragma: F = 4
exposición: 1/2000 de segundo
película: ISO = 100



¿Por qué son estables los compuestos aromáticos?

Hay moléculas dotadas de anillos bencénicos que sobreviven intactas durante períodos geológicos y persisten en las condiciones adversas de las nebulosas. Podemos describir matemáticamente las causas de su estabilidad

Jun-ichi Aihara

En 1825, se pidió a un joven director de laboratorio de la Regia Institución Londinense que analizara el residuo líquido que se forma en la producción del gas de alumbrado. Michael Faraday, de 33 años, uno de los mejores químicos de aquel tiempo, realizó entonces el descubrimiento que iniciaría una nueva rama de la química. De aquel residuo aisló un nuevo hidrocarburo; es decir, una molécula formada solamente por átomos de hidrógeno y de carbono, llamándola "bicarburet de hidrógeno", nuestro benceno, que consta de seis átomos de hidrógeno unidos a seis átomos de carbono. Es el prototipo de una clase de sustancias denominadas "compuestos aromáticos".

Tales hidrocarburos disfrutan de una valiosa propiedad común: una estabilidad insólita. Poseen una gran tendencia a conservar su estructura molecular y, por añadidura, son mucho menos reactivos que otras clases de moléculas. En su estabilidad reside uno de los motivos principales de que las moléculas aromáticas sean tan útiles: su presencia en la gasolina refuerza el octanaje, constituyen los componentes primarios de diluyentes para pinturas y de las "bolas de naftalina", entre otros productos domésticos. Los compuestos aromáticos resultan también esenciales como compuestos de partida y como disolventes en la industria moderna, contribuyendo en la fabricación de fibras sintéticas, resinas y colorantes. A pesar de su gran difusión, han eludido siempre un análisis riguroso de las causas fundamentales de su estabilidad. En el desentrañamiento de su naturaleza ha participado, con otros investigadores, el autor del artículo.

Teníamos un reto ante nosotros: los cálculos mecanocuánticos, de por sí, no proporcionan una base suficiente para predecir o calcular con exactitud la estabilidad de las moléculas aromáticas. Los intentos anteriores partían de hipótesis de las que no podíamos salirnos. No había una teoría coherente. Se fracasó también en la elucidación de otras características comunes de los compuestos aromáticos; por ejemplo, sus propiedades magnéticas excepcionales. Y lo que revestía mayor importancia: los químicos sintetizaban diversas clases de compuestos aromáticos cuyas propiedades no era posible explicar dentro del marco teórico vigente.

Para llenar ese vacío hemos desarrollado con otros investigadores la teoría de la energía de resonancia topológica, doctrina que combina la topología —el estudio matemático de las formas geométricas— y los principios cuánticos de los orbitales electrónicos y de los niveles energéticos. Ello nos ha permitido expresar la estabilidad en términos numéricos y geométricos. Tal enfoque ha resultado válido para la casi totalidad de compuestos aromáticos, incluyendo los fullerenos, moléculas tridimensionales del carbono en las que se trabaja hoy con especial ahínco.

Nuestra teoría descansa sobre fundamentos establecidos durante el siglo pasado, cuando empezó a comprenderse cómo reaccionaban los elementos y cómo se enlazaban unos con otros. La estabilidad de las moléculas aromáticas es la base de su resistencia a reaccionar químicamente; es como si la naturaleza se sintiera satisfecha con la estructura de las mismas. Una de las primeras características de las moléculas aromáticas que se conocieron fue la disposición de sus átomos de carbono en forma de anillo hexagonal cerrado. En 1865, el químico alemán August Kékulé avanzaba esa configuración; cuenta la historia que se percató de la forma del benceno después de haber soñado en una serpiente que se tragaba su propia cola.

La estructura anular es la característica distintiva de los compuestos aromáticos, y no su olor, como podría sospecharse. En realidad, muchos compuestos "aromáticos" son inodoros. Ese término se debe al descubrimiento de anillos bencénicos en algunas fragancias. Los químicos empezaron a clasificar los compuestos afines a ellos como miembros de la familia aromática, lo que consolidó esa terminología. Para complicar todavía más la cuestión, las moléculas aromáticas incluyen ahora compuestos orgánicos en los cuales algunos de sus átomos de carbono se han sustituido por átomos de nitrógeno, de azufre o de oxígeno.

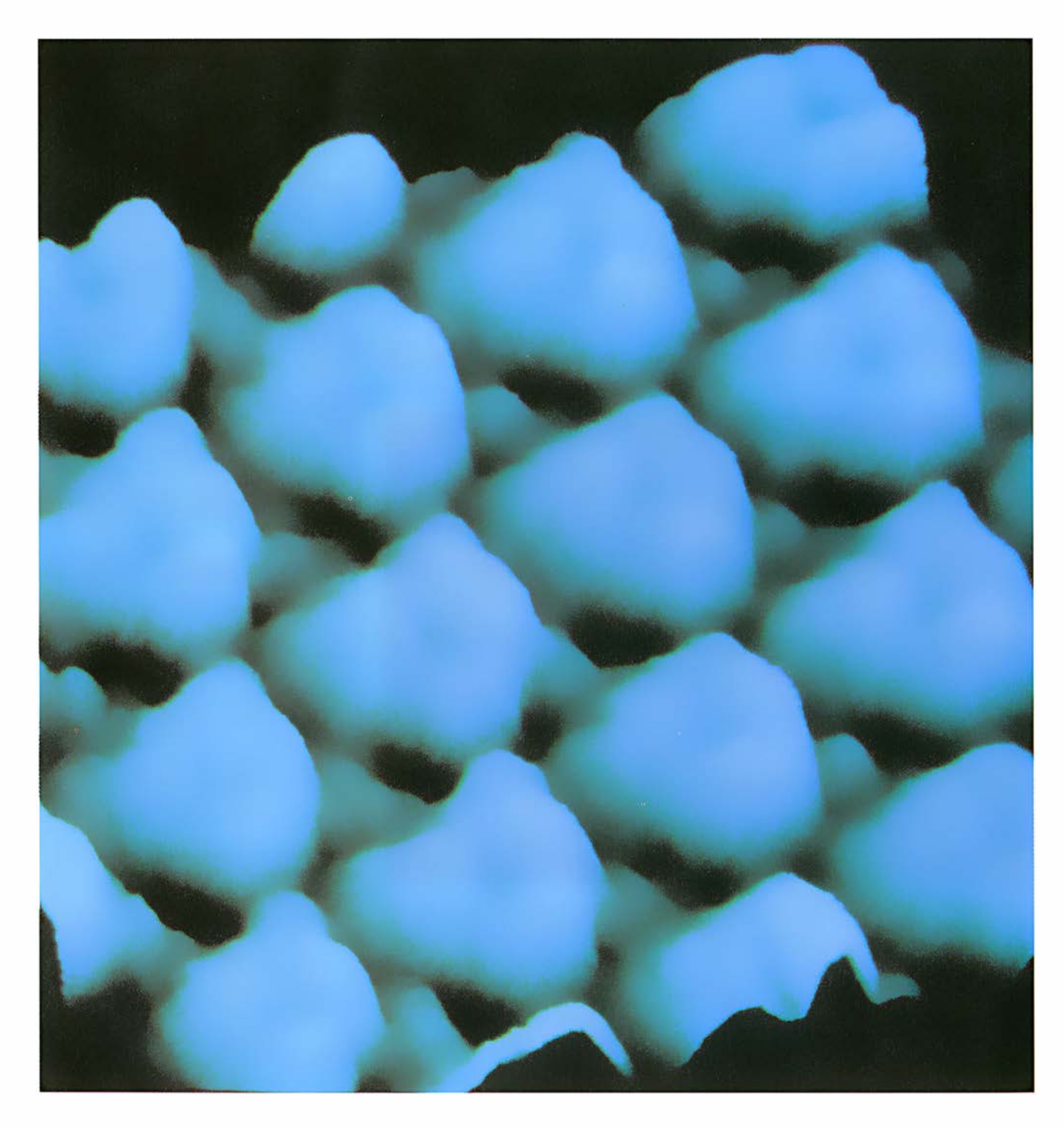
La naturaleza parece preferir el

JUN-ICHI AIHARA enseña química en la Universidad de Shizuoka. Se doctoró por la de Tokio en 1970 y fue miembro del departamento de química de la Universidad Hokkaido de Sapporo hasta 1981. Entre sus intereses resalta la investigación sobre la estructura electrónica de las moléculas orgánicas, los mecanismos de formación del polvo interestelar y el origen de la vida terrestre.

1. EL BENCENO, prototipo de los compuestos aromáticos, revela su forma anular en esta imagen de microscopio de efecto túnel. Cada molécula aparece como una protuberancia con una ligera depresión central. El aspecto borroso resulta del movimiento de ciertos electrones, llamados electrones pi, que forman los dobles enlaces.

anillo bencénico más por su forma que por su estabilidad. Es sabido que los hidrocarburos anulares se hallan muy difundidos; por citar dos ejemplos comunes, los vemos en el carbón y el hollín. Además, muchas reacciones químicas tienden a desembocar en la creación del anillo bencénico. El 5-metilen-1,3-ciclohexadieno (C_7H_8) es un compuesto bastante simple, aunque de nombre algo complicado (los números intercalados se refieren a ciertos átomos de carbono que participan en los enlaces); esta molécula pertenece a otra familia química, la de los alquenos, y, si bien su forma recuerda la del benceno, es muy reactiva. Por adición de un poco de ácido, la estructura de la molécula cambia, transformándose en un compuesto aromático: el tolueno (C_7H_8), que consiste en un anillo bencénico con un sustituyente CH_3 unido a uno de sus átomos de carbono.

Las combustiones habituales producen una nutrida variedad de compuestos aromáticos. En principio, la combustión debería transformar los hidrocarburos en dióxido de carbono y agua, solamente. Sin embargo, esta combustión no suele ser total, formándose hollín y humo. Efectivamente, los gases residuales contienen compuestos aromáticos constituidos por varios anillos, o compuestos policíclicos, algunos de los cuales son muy tóxicos. Los químicos suelen identificar estos compuestos en dichos gases mediante la cromatografía, técnica que permite la separación de sus componentes. C. Fetzer y Wilt R. Biggs, de la compañía Chevron, y Kiyokatsu Jinno, de la Universidad Tecnológica de Toyohashi, hallaron en el hollín de los gases de combustión de los motores diésel no sólo compuestos aromáticos de pe-



queño tamaño, como el benceno, el naftaleno ($C_{10}H_8$) y el fenantreno ($C_{14}H_{10}$), sino también moléculas grandes, como el coroneno ($C_{24}H_{12}$) y el ovaleno ($C_{32}H_{14}$). Se acepta que el hollín es un agregado de moléculas grandes dotadas de numerosos anillos bencénicos.

La estructura bencénica se forma en el espacio exterior lo mismo que en la Tierra. Se sabe que los meteoritos de condritas carbonáceas, una de las clases de cuerpos más antiguos del sistema solar, contienen numerosos compuestos aromáticos policíclicos. Estos compuestos podrían haber surgido cuando el hidrógeno reaccionó químicamente, en una superficie apropiada, con el monóxido de carbono. También es posible que los compuestos aromáticos de los meteoritos aparecieran en el espacio interestelar y quedaran luego atrapados por el sistema solar en su proceso de coalescencia. Las estrellas, en las últimas fases de su vida, sintetizan elementos pesados, carbono incluido, y los expulsan al espacio, donde pueden reaccionar con el hidrógeno. En 1985, Louis J. Allamandola y sus colegas del Centro Ames de la NASA comprobaron el estrecho parecido entre los espectros de las nebulosas y los del hollín de automóvil.

Pero, ¿por qué tales hidrocarburos son tan estables en el universo? En general, las moléculas son estables porque todos sus átomos constituyentes poseen suficientes "electrones de valencia", que son los que participan en el enlace químico. Tales electrones residen en la "capa" externa, o de valencia, que debe llenarse con un número adecuado de ellos a fin de que los átomos que se unan lo hagan de forma estable.

Una manera de lograrlo consiste en "robar" electrones de otros átomos. El cloro, que tiene siete electrones de valencia, toma un electrón de un átomo dador, completando así su capa de valencia. La adición de un electrón deja al cloro cargado negativamente; luego, éste se enlazará con un ion cargado positivamente. (Si el dador electrónico es el sodio, los dos formarán la sal común o de cocina.) Estas uniones se denominan enlaces iónicos.

No obstante, el carbono prefiere compartir electrones a robarlos. Un átomo de carbono posee cuatro electrones de valencia, pero requiere otros cuatro para completar su capa de valencia. En uno de los hidrocarburos más sencillos, el metano (CH_4), cada hidrógeno comparte su único electrón con el carbono, llenando así su capa de valencia. A su vez, el carbono comparte uno de sus electrones de valencia con cada hidrógeno, que precisa de dos electrones más para llenar su capa. Las uniones resultantes se llaman enlaces covalentes.

Los compuestos aromáticos no obedecen a rajatabla esa regla. El benceno cuenta sólo con seis átomos de hidrógeno y seis de carbono; le faltan, pues, electrones para completar la capa de valencia del carbono. No obstante, y apoyándose en la extraordinaria estabilidad del benceno, se llega a la conclusión de que todos los átomos de carbono presentan llenas sus capas. Al parecer, cada átomo de carbono comparte más de dos electrones de valencia con el átomo de carbono más cercano. En otras palabras, entre algunos de los átomos de carbono debe existir más de un enlace. Concretamente, en su estructura anular, tres enlaces sencillos deben alternar con tres enlaces dobles (dobles enlaces). Los enlaces sencillos y los dobles se simbolizan, respectivamente, C – C y C = C. (Las moléculas cíclicas que poseen esta disposición alternante se denominan también anulenos.)

Los dos enlaces que integran los dobles enlaces se conocen por enlace sigma y enlace pi; sigma es un enlace sencillo y muy fuerte; pi es, por contra, bastante débil. Así pues, los electrones del enlace pi son inestables en comparación con los electrones sigma.

2. LA ESTRUCTURA MOLECULAR del benceno muestra la alternancia de los enlaces sencillos y los dobles. Puesto que existen dos posibles formas de alternancia de los enlaces (*arriba*), se dice que el benceno es un híbrido de resonancia. Esta imagen de la resonancia está asociada al hecho de que los orbitales atómicos en los cuales residen los electrones pi (los llamados orbitales *p*) se solapan con los de sus vecinos. La zona de solapamiento se indica mediante líneas de trazo discontinuo (*abajo, a la izquierda*). Por consiguiente, los electrones pi están deslocalizados; es decir, no permanecen inmóviles. Se mueven por las zonas comunes formando unas "nubes pi" en forma de rosquilla (*abajo, a la derecha*).

Aunque los químicos se refieran a ciertos electrones de enlace, sólo lo hacen con fines contables. La mecánica cuántica permite la libre circulación de los electrones pi entre átomos de carbono adyacentes. Por consiguiente, se puede conceder que el benceno posee enlaces pi de energía parecida. En realidad, el benceno es un híbrido de dos configuraciones posibles, donde se alternan enlaces dobles con sencillos, por cuya razón se le considera un híbrido de resonancia.

Pero no podemos limitar a la deslocalización de los electrones pi la explicación entera de la excepcional estabilidad de los compuestos aromáticos. En el ciclobutadieno (C_4H_4), un anillo de cuatro carbonos dotado de dos dobles enlaces, los electrones pi pueden vagar por su estructura. A pesar de ello, y a diferencia del benceno, el ciclobutadieno es reactivo y difícil de preparar. Los químicos lo

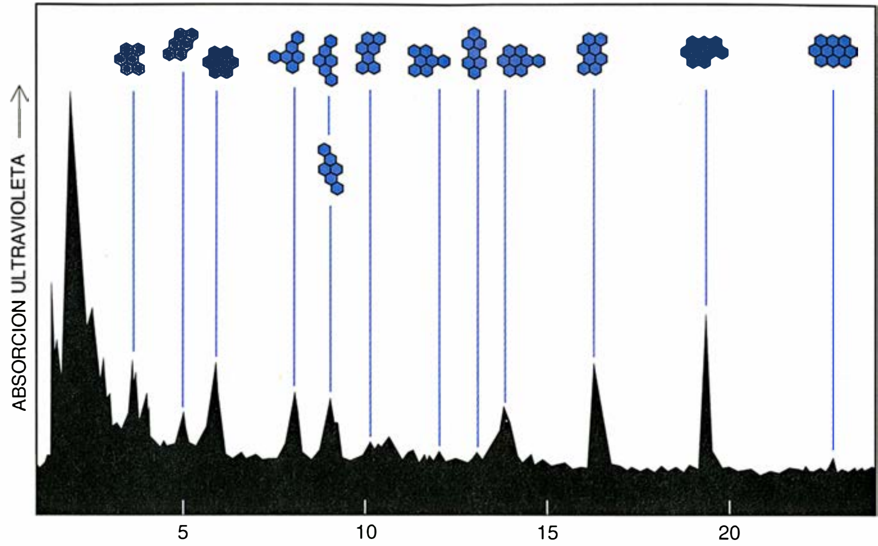
han obtenido a temperaturas de unos 20 kelvin, y se descompone al calentarlo. ¿Por qué un anillo de seis carbonos es tan estable y, sin embargo, es tan reactiva una estructura similar de cuatro carbonos?

En 1931, Erich Hückel, químico alemán, ofrecía una explicación parcial con su regla para determinar la estabilidad de los electrones pi en las moléculas. Consideró las moléculas como si fueran átomos. Los electrones pi llenarían los "orbitales moleculares" como si se tratara de orbitales atómicos. Igual que los átomos, las moléculas tendrían unos "números mágicos", que son el número de electrones pi necesarios para completar sus capas moleculares. Estos números mágicos son 2, 6, 10, 14, y así sucesivamente. Cualquier otro número de electrones pi corresponde a compuestos inestables.

La regla admite una formulación general: las moléculas y los iones de un solo anillo que contienen un múltiplo de cuatro electrones pi (es decir, $4n$, en donde n es un número entero y positivo) son extremadamente inestables; por contra, las que poseen un número mágico de electrones (a saber, $4n+2$) son estables. Esta regla explicaba así por qué el benceno, con seis electrones pi ($n=1$), es estable y por qué el ciclobutadieno, que posee cuatro, no lo es.

El enfoque de los orbitales moleculares de Hückel fue uno de los más útiles para la determinación de la estabilidad de los compuestos aromáticos. Se aplicaba, no obstante, de manera exclusiva a las moléculas de un solo anillo. El ingente progreso registrado en química orgánica después de la Segunda Guerra Mundial condujo a la síntesis de moléculas aromáticas grandes, muchas de ellas formadas por combinación de varios anillos. La ley de Hückel se mostró incapaz de determinar la estabilidad de tales nuevas moléculas policíclicas.

Se dio un nuevo paso al frente en 1964, cuando Michael J. S. Dewar, hoy en la Universidad de Florida en Gainsville, y otros desarrollaron la idea de energía de resonancia. En el curso de sus estudios sobre los estados cuánticos de los electrones pi en las moléculas, descubrieron que los enlaces individuales de las moléculas anulares diferían de los enlaces de las moléculas organizadas en cadena. Percibieron que, en las moléculas catenarias, los mismos tipos de unión poseen aproximadamente las mismas



3. ESPECTRO DE LUZ ULTRAVIOLETA de los gases de escape de un motor diésel; nos muestra que el hollín que contienen consiste en una mezcla de numerosos compuestos aromáticos policíclicos (*representados por hexágonos*). Los hidrocarburos, extraídos mediante un disolvente orgánico, aparecen como picos de absorción intensos. Los picos iniciales representan moléculas aromáticas relativamente pequeñas.

energías de enlace; a modo de ejemplo: en una cadena hidrocarbonada con dobles enlaces y enlaces sencillos alternando, la energía de enlace del C = C es de 5,5378 electronvolts (eV), y la del C – C, 4,3499 eV. El carbono se une al hidrógeno con una energía de unos 4,4375 eV.

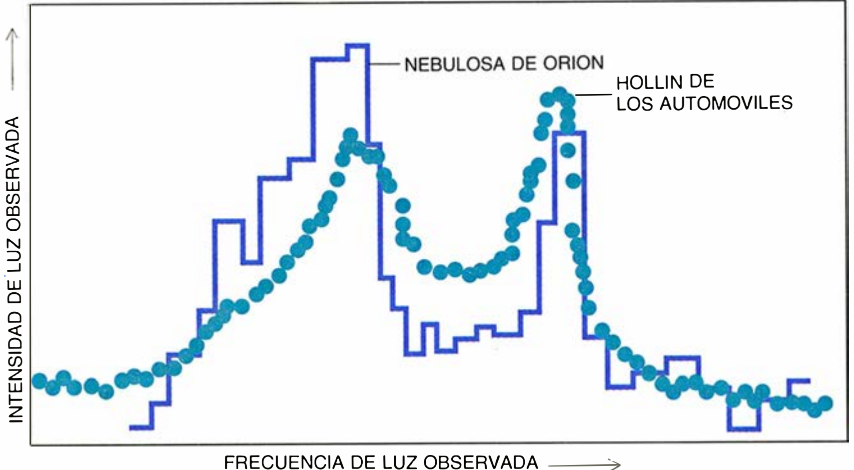
Este hecho facilita el cálculo de la cantidad de energía requerida para romper una molécula de cadena en sus átomos constituyentes. Esta energía se llama energía de atomización. Para obtener la energía de atomización de toda la cadena basta con sumar las energías de enlace de toda ella. Por ejemplo, el butadieno posee dos dobles enlaces, un enlace sencillo y seis enlaces carbono-hidrógeno. Así, su energía de atomización resulta ser de 42,051 eV. La calculada mediante la refinada teoría de los orbitales moleculares es de 42,054 eV, de acuerdo con el valor de la suma de las energías de enlace.

Las estructuras anulares se resisten a este enfoque directo. Para el benceno, la suma de las energías de enlace es de 56,288 eV (tres dobles enlaces, tres enlaces sencillos y seis enlaces carbono-hidrógeno). Este valor debiera ser igual a la energía de atomización. Sin embargo, los cálculos indican que es de 57,157 eV, valor que lo supera en 0,869 eV. Tal diferencia corresponde a una estabilidad de 20 kilocalorías. Puesto que se supone que los enlaces carbono-hidrógeno poseen la misma energía, se hallen en anillos o en cadenas, la diferencia de 20 kilocalorías debe residir en la estructura de los enlaces carbono-carbono; es decir, en el anillo. Dewar y sus colegas llaman energía de resonancia a esta energía de estabilización. El término "resonancia" alude al hecho de que los electrones pi están deslocalizados y son estables energéticamente. (Muchos libros de texto dan a la energía de resonancia el valor de 36 kilocalorías, cifra que se basa en una definición diferente de la energía de resonancia que no se limita al carácter aromático.)

El benceno no es caso único. Otras moléculas anulares tienen energías de atomización diferentes de las que resultan de la suma de energías de enlace, pudiendo ser tanto positivas como negativas las energías de resonancia. Dewar consideró compuestos aromáticos aquellos cuyas energías de resonancia eran positivas, definición que se está aceptando como canónica.

La energía de resonancia por electrón pi constituye, en verdad, un exponente de la estabilidad mejor que la propia energía de resonancia. Una elevada energía por electrón pi significa que los enlaces pi, normalmente débiles, son entonces más fuertes. El benceno posee uno de los valores más elevados. Las moléculas anulares como el ciclobutadieno poseen una energía de resonancia por electrón pi negativa. Estos compuestos, de ardua síntesis, se descompo-





4. NEBULOSA DE ORION (*fotografía*), donde hay probablemente varios compuestos aromáticos. El espectro infrarrojo de su zona central (*diagrama*) se parece mucho al de la luz dispersada (espectro Raman) por el hollín de automóvil que, como es sabido, contiene muchas moléculas aromáticas. Se cree que tales compuestos se hallan distribuidos por todo el universo.

nen fácilmente. En conclusión, la energía de resonancia explica por qué los compuestos aromáticos se forman con tanta facilidad y por qué su estructura anular es estable.

Aunque el concepto de la energía de resonancia de Dewar permitió profundizar en la comprensión de la estabilidad de los compuestos aromáticos, dejó una cuestión por contestar: ¿Tienen siempre la misma energía de enlace los enlaces similares en moléculas de cadena? Hasta ahora, la investigación no ha ofrecido respuesta alguna. El propio Dewar pensó que el asignar iguales energías de enlace a los enlaces era cuestión de conveniencia. No pudo explicar por qué las estructuras anulares afectan la estabilidad. La idea de Dewar, aunque provechosa, se apoya en relaciones empíricas y esto, por sí mismo, no muestra la verdadera naturaleza de la estabilidad de los compuestos aromáticos.

Más importante todavía, la definición de Dewar no es aplicable a todas las moléculas anulares; no lo es en particular a las dotadas de carga eléctrica. En el ion ciclopentadienuro ($C_5H_5^-$) y en el ion tropilio ($C_7H_7^+$) circulan seis electrones pi por el anillo, igual que en el benceno, pero la definición de Dewar no explica por qué estos iones son estables.

En 1975, nosotros e, independientemente, Ivan Gutman, Milorad Milun y Nenad Trinajstić, del Instituto Rugjer Bošković de Zagreb, ideamos un método que permitió vencer la mayoría de las dificultades que el método de Dewar era incapaz de resolver. Aplicamos la teoría topológica de la matemática a la teoría de los orbitales moleculares de Hückel. A diferencia del método de Dewar, nuestra descripción no precisa calcular la energía en los enlaces individuales. En cambio, interpreta globalmente la molécula en términos matemáticos, llegando a deducir la energía de resonancia (estabilización) para un compuesto dado. El procedimiento parte de estructuras anulares y las reconfigura matemáticamente como moléculas de cadena hipotéticas.

Los cálculos, cabía presumirlo, son complejos. Afortunadamente, para penetrar en la esencia del método podemos pasar por alto los pormenores. El primer paso consiste en definir, para el compuesto en cuestión, una ecuación específica, llamada polinomio característico. Este polinomio puede deducirse de la teoría de los orbitales moleculares de Hückel. Sus raíces representan los niveles energéticos de los electrones pi.

Ahora bien, estos niveles energéticos no dan por sí mismos la energía de resonancia. Después de todo, es necesario distinguir entre la energía de los enlaces y la energía de la propia estructura anular. A fin de hallar la diferencia entre ellas, se genera una estructura hipotética suponiendo que los electrones pi no pueden circular por el anillo; es decir: los electrones se comportan como si estuvieran en una cadena. Esta estructura la denominamos molécula de cuasicadena. Se obtiene así un polinomio de referencia (o un "polinomio acíclico", en expresión de Trinajstić y sus colaboradores).

La resolución del polinomio de referencia da los niveles energéticos para los electrones pi de los mismos átomos pero organizados en forma de molécula de cuasicadena. La diferencia entre los niveles de energía reales (anillo) y aquellos de la estructura hipotética (cuasicadena) es la estabilización energética "adicional" asociada a las estructuras anulares. Esta energía indica claramente la existencia de una contribución energética de origen cíclico. La energía de resonancia se expresa en unidades del valor absoluto de β (que se escribe $|\beta|$). Esta cantidad, basada en la teoría de los orbitales moleculares, es negativa y representa el grado de interacción mutua entre las capas de valencia de átomos adyacentes.

El método de la energía de resonancia topológica muestra numéricamente por qué son estables los com-

Estabilidad de algunas moléculas anulares del carbono

Las energías de resonancia topológica por electrón pi (entre paréntesis), dadas en unidades del valor absoluto de β, miden la estabilidad. Los compuestos aromáticos estables poseen energías positivas; los valores negativos de la energía corresponden a especies antiaromáticas. En los diagramas estructurales, se representan sólo los enlaces carbono-carbono del anillo, prescindiendo de los enlaces carbono-hidrógeno. Así pues, el diagrama del benceno no es simplemente un hexágono. Las líneas rojas simbolizan los enlaces pi.



BENCENO
(0,0454)
MUY ESTABLE



NAFTALENO
(0,0389)
ESTABLE



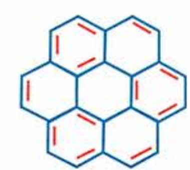
ANTRACENO
(0,0339)
ESTABLE



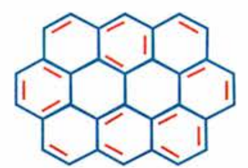
FENANTRENO
(0,0390)
ESTABLE



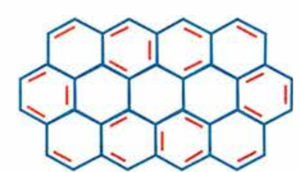
PIRENO
(0,0374)
ESTABLE



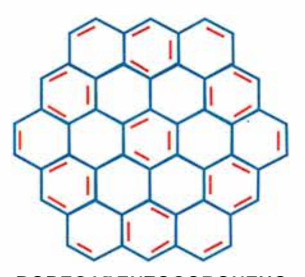
CORONENO
(0,0395)
MUY ESTABLE



OVALENO
(0,0382)
ESTABLE



CIRCUMANTRACENO
(0,0369)
MUY ESTABLE,
PODRIA EXISTIR
EN LAS NEBULOSAS



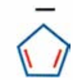
DODECABENZOCORONENO
(0,0388)
AUN NO SINTETIZADO,
SE CREE QUE ES ESTABLE
Y QUE EXISTE EN LAS NEBULOSAS



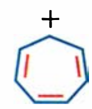
BUCKMINSTERFULLERENO (C_{60})
(0,0274)
MOLECULA GRANDE, ESTABLE Y HUECA
QUE ES LA TERCERA FORMA DE CARBONO PURO;
POSEE DIVERSAS PROPIEDADES CUANDO
SE COMBINA CON OTROS ELEMENTOS



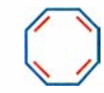
CICLOBUTADIENO
(−0,3066)
EXTREMADAMENTE INESTABLE;
NO ES AISLABLE, A PESAR DE
HABERSE PODIDO SINTETIZAR



ION CICLOPENTADIENURO
(0,0528)
REACCIONA CON EL OXIGENO
PERO ES UNO DE LOS IONES
NEGATIVOS MAS ESTABLES



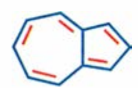
ION TROPILIO
(0,0376)
UNO DE LOS IONES POSITIVOS
MAS ESTABLES



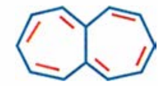
CICLOOCTATETRAENO
(−0,0744)
MUY REACTIVO,
ESTRUCTURA NO PLANA
IMPIDE QUE LOS ELECTRONES PI
SE MUEVAN POR UN ANILLO



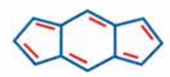
PENTALENO
(−0,0269)
EXTREMADAMENTE REACTIVO;
NO ES AISLABLE,
INCLUSO SI SE SINTETIZA



AZULENO
(0,0151)
BASTANTE ESTABLE



HEPTALENO
(−0,0118)
NO PLANO;
REACCIONA CON EL OXIGENO
Y SE POLIMERIZA AL CALENTARLO

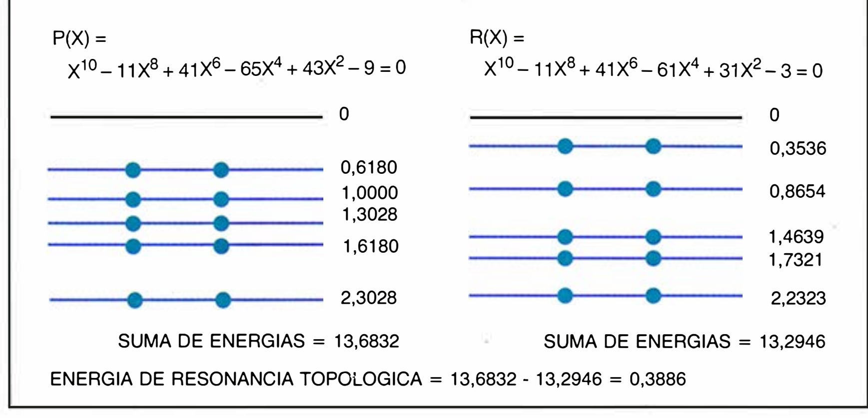


***s*-INDACENO**
(0,0046)
INESTABLE TERMICAMENTE;
SE OXIDA FACILMENTE

Energía de resonancia topológica del naftaleno

NAFTALENO $C_{10}H_8$

Se puede determinar la estabilidad de esta molécula resolviendo primeramente su polinomio característico P(X) (*columna de la izquierda*). Las raíces de esta ecuación determinan las energías de los 10 electrones pi del naftaleno (*puntos*), que de dos en dos llenan cada nivel energético. (Otros cinco niveles más elevados, que no se muestran, permanecen vacantes.) Las energías de los electrones (en unidades β) se comparan con las encontradas con el polinomio de referencia R(X) (*columna de la derecha*), que interpreta matemáticamente el naftaleno como una molécula de "cuasicadena". La diferencia de energías es la energía de resonancia topológica, igual a 0,3886|β|.



puestos aromáticos. Los electrones pi viajan a través de las estructuras anulares de tal forma que estabilizan toda la molécula. A pesar de que los electrones pi se encuentran también en muchas moléculas de cadena, no existe para ellos curso anular alguno. Por consiguiente, la energía de resonancia es nula.

Así pues, nuestra definición de la energía de resonancia constituye la única descripción unificada a disposición de los químicos, y engloba los intentos anteriores para explicar la aromaticidad. Igual que en el enfoque de Dewar, una energía de estabilización positiva significa que la molécula se halla estabilizada por los electrones pi que se mueven en un curso anular, lo cual indica, a su vez, que la molécula es aromática. (La energía de resonancia topológica da valores muy parecidos a los de la energía de resonancia de Dewar, si se asigna a β el valor de –3,562 eV.) Pero, además, nuestra teoría sortea la suposición ineludible según la cual los enlaces similares en moléculas de cadena poseen energías de enlace iguales. Todavía más importante: el método es válido para los iones, permitiendo obtener energías de resonancia de anillos dotados de carga con la misma precisión que las calculadas para anillos neutros.

El enfoque de la energía de resonancia topológica corrobora la regla de Hückel. Hiroshi Ichikawa, de la Facultad Hoshi de Farmacia de Tokio, y nosotros hemos mostrado que las moléculas y los iones de un solo anillo con el mismo número mágico de electrones pi ($4n$+2) poseen siempre una energía de estabilización positiva y, por consiguiente, son compuestos aromáticos. Todas las otras moléculas monocíclicas, neutras o cargadas, tienen energías negativas y, en consecuencia, son inestables, de acuerdo con la regla de Hückel.

Haruo Hosoya y Kikuko Hosoi, de la Universidad Ochanomizu de Tokio, y Gutman, actualmente en la Universidad serbia de Kragujevac, han seguido un enfoque de la energía de resonancia topológica similar, demostrando que la regla de Hückel es aplicable a compuestos policíclicos de gran tamaño. (Se suponía imposible tal extensión de la regla.) Postularon que las moléculas neutras eran estables energéticamente si los electrones pi podían moverse por muchos cursos hexagonales; pero, si sólo había cursos tetragonales o heptagonales, las moléculas tendían entonces hacia la inestabilidad. Este razonamiento explica por qué los hidrocarburos aromáticos policíclicos poseen energías de resonancia elevadas. Puesto que tales moléculas están constituidas por muchos anillos bencénicos unidos, los electrones pi pueden seguir varios cursos hexagonales, lo que confiere una gran estabilidad a las estructuras en cuestión. Hemos demostrado matemáticamente que la regla Hosoya-Hosoi-Gutman es aplicable aceptablemente bien a la mayoría de las moléculas neutras.

Nuestra teoría ha comenzado ya a evidenciar su poder y su utilidad. En 1984, Alain Léger y Jean-Loup Puget, de la Universidad de París VII, postularon la existencia de mezclas de compuestos aromáticos de gran tamaño en las nebulosas. Tres años después, determinábamos la clase de compuestos aromáticos que probablemente existe en las nebulosas. Tales compuestos no podían ser moléculas pequeñas; en efecto, los cálculos de la energía de resonancia topológica y los datos de la observación astronómica infrarroja indicaban que la intensa luz ultravioleta de las estrellas próximas excitaría y destruiría las moléculas aromáticas pequeñas. Pero también demostramos que los hidrocarburos policíclicos grandes y compactos podían persistir en las nebulosas. Los cálculos indicaban, asimismo, que los estados excitados de tales moléculas poseían elevadas energías de resonancia y, por ende, podían alojarse en un entorno hostil. Las observaciones astronómicas actuales respaldan tales predicciones.

Uno de los compuestos aromáticos que ofrecen mayor verosimilitud de encontrarse en las nebulosas es el dodecabenzocoroneno. Esta molécula, todavía por sintetizar, está formada por 19 anillos bencenoides dispuestos hexagonalmente. La molécula del circumantraceno es asimismo otra posibilidad. En 1987, calculamos la estabilidad de estos compuestos, y el año pasado, Richard D. Broene y François N. Diederich, de la Universidad de California en Los Angeles, sintetizaron el circumantraceno; este compuesto es muy estable.

La teoría de la energía de resonancia topológica se aplica también a los fullerenos, que son estructuras carbonosas, tridimensionales, grandes y huecas. El más facil de obtener es el carbono 60 (C_{60}), que se produce por evaporación del grafito mediante láser. La forma de esta molécula es parecida a la de una pelota de fútbol. El carácter polifacético y las propiedades diversas de tales moléculas han despertado un gran interés científico a partir de 1990, a raíz de poderse obtener en cuantía apreciable [véase "Fullerenos", por Robert F. Curl y Richard E. Smalley; INVESTIGACION Y CIENCIA, diciembre de 1991].

La estructura de los fullerenos presenta problemas para las teorías de la aromaticidad anteriores. No podemos aplicar la regla $4n$+2 de Hückel al C_{60} porque su molécula constituye una estructura policíclica tridimensio-

nal. El método de Dewar falla asimismo, porque se desconocen las energías de enlace para ese sistema. En 1988, Hosoya y nosotros predijimos que el C_{60}, que contiene 20 hexágonos bencenoides y 12 pentágonos, es moderadamente aromático. Calculamos que la energía de resonancia por electrón pi es de 0,0274|β|. (El valor para el benceno, fuertemente aromático, es de 0,0454|β|.) Los iones negativos del C_{60} son tan aromáticos como la molécula neutra. El C_{60}^{3-}, cargado triplemente, que se torna superconductor a temperaturas muy bajas, posee una energía de resonancia por electrón pi de 0,0241|β|. De todas maneras, los iones positivos parecen ser mucho menos aromáticos.

A mayor abundamiento, el enfoque de la energía de resonancia topológica es la única teoría que explica en términos de aromaticidad el diamagnetismo. Las moléculas diamagnéticas sufren repulsión por campos magnéticos. Esta propiedad resulta del movimiento de los electrones en la molécula. El campo magnético exterior, actuando sobre los electrones en movimiento, modifica los estados cuánticos de todos los electrones. Tal modificación induce un momento magnético orientado en sentido opuesto al campo aplicado.

Aunque todos los compuestos orgánicos poseen en mayor o menor grado esa propiedad, las moléculas orgánicas exhiben un realzado diamagnetismo. La repulsión crece a medida que aumenta el campo magnético. En 1981, pudimos relacionar las propiedades diamagnéticas del movimiento anular con la energía de resonancia topológica. Tal relación no es simple. En esencia, si los electrones pi se mueven en trayectorias anulares que estabilizan la molécula, entonces se exalta el diamagnetismo; éste remite, por contra, en las trayectorias que desestabilizan la estructura. Un aumento del diamagnetismo pone de manifiesto la existencia en la molécula de una fuerte tendencia a permanecer estable, esforzándose en neutralizar el efecto del campo magnético exterior.

La adopción de la energía de resonancia topológica como índice de estabilidad podría tener una doble desventaja. Primera, el polinomio característico descansa en la teoría de los orbitales moleculares de Hückel, que no está libre de ciertas aproximaciones y puede, por ello, fracasar. (De cualquier modo éste es el único marco aplicable al estudio analítico de la aromaticidad.) Segunda, la energía de resonancia topológica representa realmente la estabilidad energética (termodinámica). Es posible que algunos compuestos sean inestables energéticamente e inertes químicamente. Es decir, la molécula podría tener una energía de resonancia negativa y, a pesar de ello y por alguna razón, no reaccionar químicamente con facilidad. En tales casos, la energía de resonancia topológica no representaría la estabilidad de la molécula.

Para nuestra fortuna, la mayoría de las moléculas estables desde el punto de vista energético lo son también desde el punto de vista químico. La capacidad general de predicción del método de la energía de resonancia topológica sigue siendo operativa para todos los compuestos, excepto unos pocos. Por tanto, después de más de 100 años de acoso teórico, no parece arriesgado afirmar que se ha alcanzado finalmente una explicación de la estabilidad de los compuestos aromáticos. Se espera que los científicos encuentren en ella un instrumento útil y con capacidad de predicción mediante el cual puedan seguir explorando el mundo de la química.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A NEW DEFINITION OF DEWAR-TYPE RESONANCE ENERGIES. J. Aihara en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 98, n.º 10, págs. 2750-2758; 12 de mayo de 1976.

GRAPH THEORY AND MOLECULAR ORBITALS, Parte 19: NON-PARAMETRIC RESONANCE ENERGIES OF ARBITRARY CONJUGATED SYSTEMS. I. Gutman, M. Milun y N. Trinajstic en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 99, n.º 6, págs. 1692-1704; 16 de marzo de 1977.

UNIFIED THEORY OF AROMATICITY AND LONDON DIAMAGNETISM. J. Aihara en *Journal of the American Chemical Society*, vol. 103, n.º 19, págs. 5704-5706; 23 de septiembre de 1981.

AROMATICITY AND DIATROPICITY. J. Aihara en *Pure and Applied Chemistry*, vol. 54, n.º 5, págs. 1115-1128; mayo de 1982.

CHEMICAL GRAPH THEORY, vol. 2. N. Trinajstic. CRS Press, 1983.

SPHERICAL AROMATICITY OF BUCKMINSTERFULLERENE. J. Aihara y H. Hosoya en *Bulletin of the Chemical Society of Japan*, vol. 61, n.º 7, págs. 2657-2659; julio de 1988.

SYSTEMATIC CHEMISTRY OF C_{60} BEGGINING TO EMERGE. R. M. Basum en *Chemistry & Engineering News*, vol. 69, n.º 50, págs. 17-20; 16 de diciembre de 1991.

FULLERENOS. R. F. Curl y R. F. Smalley en *Investigación y Ciencia*, n.º 183, págs. 14-24; diciembre de 1991.

Telas y sedas de araña

La seda y los patrones de las telas de las arañas se rigen por los mismos principios que se aplican a la ciencia de los materiales y a la ingeniería estructural del hombre

Fritz Vollrath

Conocemos mejor las arañas por sus magníficos logros de ingeniería estructural que por la fabricación de materiales escogidos. A diferencia de lo conseguido con el hilo de la larva de la mariposa de la seda (*Bombyx mori*), o gusano de seda, el hombre no sabe todavía explotar industrialmente la seda de las arañas. Se han utilizado telarañas en vendajes de heridas e incluso en redes de pesca, pero la seda sólo ha podido aprovecharse como hilo de retícula en instrumentos ópticos.

Posee esa seda, sin embargo, cualidades fabulosas. Mucho más resistente que la del gusano de seda, es, además, polimorfa: las arañas pueden producir distintos tipos de seda para funciones diferentes. Tal gama de sedas de naturaleza dispar ha conducido a la evolución de una serie sorprendente de diseños de telarañas.

Si comparamos las propiedades de la seda de las arañas con las de la seda del gusano de la morera, su contrapartida objeto de muchísimos estudios, empezaremos a comprender de qué modo las arañas adquirieron su notable habilidad tejedora. Y si abordamos la mecánica funcional de ciertas telarañas, veremos por qué la rigidez de la mayor parte de la seda de araña limita la gama de patrones de telarañas y su capacidad de capturar presas. Igual que los materiales de construcción, la seda de araña condiciona, en última instancia, el proyecto arquitectónico. Cualquier estructura, trátese de nuestra tela o de un puente, alcanzará la eficacia que den de sí los materiales de la obra. A no ser que el constructor esconda un as en la manga.

La hábil heroína de *La telaraña de Charlotte*, narración breve de E. B. White, ofrece un ejemplo de araña con un recurso así. Valiéndose de chapuzas brillantes, la araña de jardín europea (*Araneus diadematus*) ha convertido un punto débil de la seda (su blandura cuando está húmeda) en un rédito de valor incalculable. Como veremos más adelante, el empapar hilos específicos en agua hizo rentable la telaraña; amén de permitir a los antepasados de *A. diadematus* introducirse en un nicho ecológico nuevo, el de los espacios abiertos.

El invento de la araña de jardín europea constituye un ejemplo de un factor evolutivo importante: las limitaciones. El cambio evolutivo viene instado por modificaciones adaptativas del comportamiento y la morfología. Con el tiempo, los cambios graduales topan con límites fisiológicos o físicos. Si levantamos esas compuertas, aparecerán nuevas posibilidades. La analogía con el progreso tecnológico humano es evidente.

Las arañas y los gusanos de seda no guardan ninguna relación de parentesco directo, pero sus sedas respectivas son muy semejantes. Ambas utilizan queratina, una proteína que también se encuentra en el pelo, los cuernos y las plumas. En pelos y cuernos, esta proteína se llama alfa queratina, y aparece en forma de filamentos, helicoidales y trenzados, de cadenas de aminoácidos. Los arácnidos ancestrales pudieron haber usado la alfa queratina como cemento para recubrir sus huevos; los insectos ancestrales pudieron haberla empleado para fijar a la vegetación sus estuches pupales.

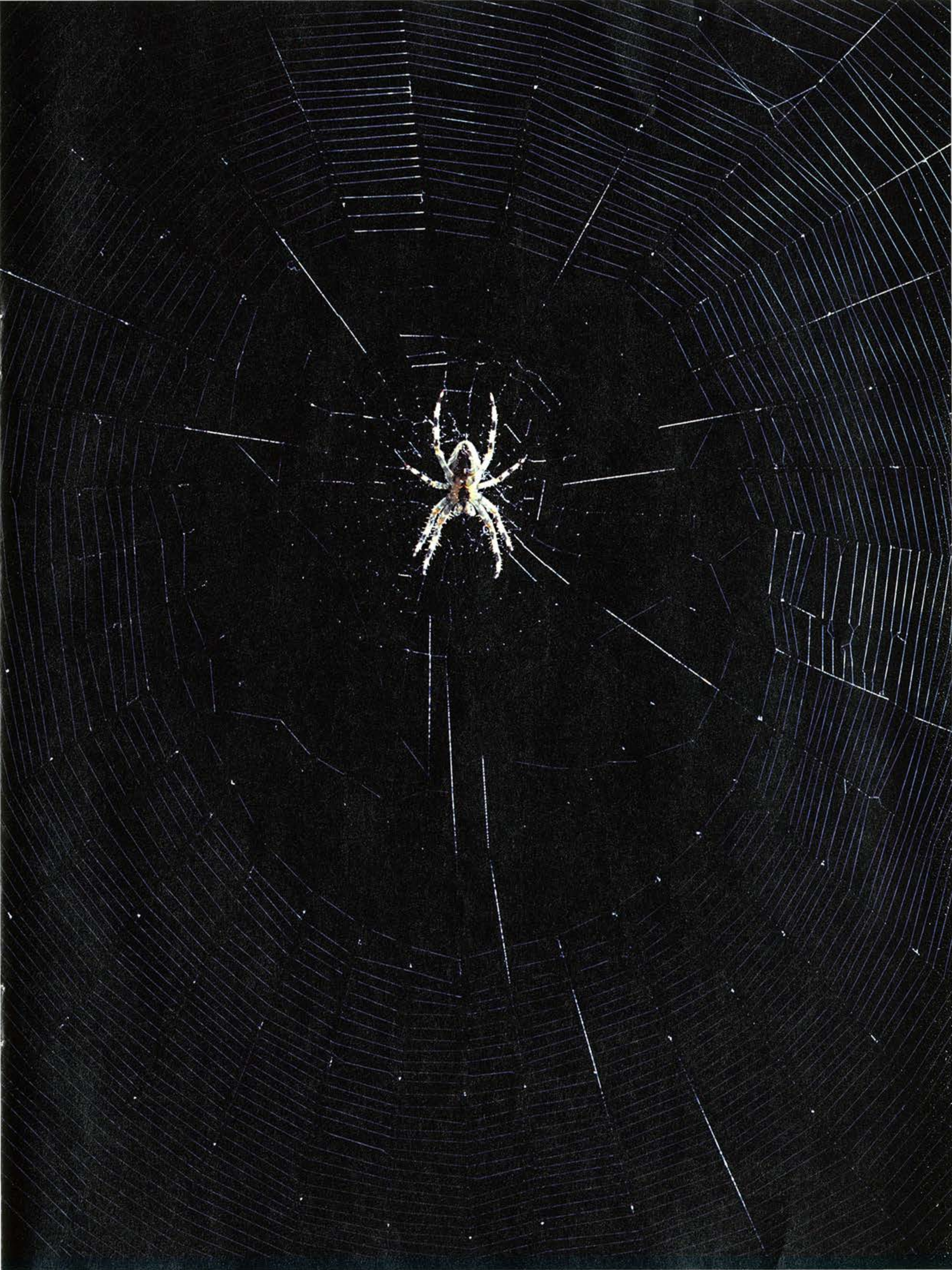
Gusano de seda y arañas han desarrollado un sistema de presión de bomba y válvula que les permite fabricar filamentos con esas proteínas. Ahora bien, no exudan un gel de desecación lenta de cadenas de alfa queratina, sino que los conductos glandulares espesan la sustancia hasta un estado muy viscoso: un cristal líquido nemático, en el que las moléculas se organizan en líneas paralelas. Intervienen potentes fuerzas de cizalla que se aplican al filamento emergente por una boquilla de extrusión y determinan que muchas cadenas alfa formen una estructura terciaria, estable: en hoja plegada beta. Como puede observarse en la seda del gusano de la morera, estas hojas se doblan una sobre otra, en acordeón, y constituyen un cristal.

A su vez, los cristales proteínicos se incrustan en una matriz gomosa compuesta de cadenas de aminoácidos que no están unidos en hojas plegadas beta. Dichos filamentos helicoidales se hallan, en cambio, enmarañados en un estado de elevada entropía. Esa aleatoriedad es, justamente, lo que confiere a la seda, como ocurre con el caucho, una elasticidad excepcional. Cuando un hilo se estira, los filamentos de proteína se desenredan, pero resisten, mientras que al soltar el hilo se contraen de nuevo en un desorden caprichoso.

La elasticidad de la seda se compensa con la resistencia. Por tratarse de un material compuesto, como las fibras de vidrio incrustadas en una resina, la seda es resistente. Cristales

FRITZ VOLLRATH, docente de zoología en la Universidad de Basilea, es investigador asociado en la de Oxford. Después de estudiar la ecología de las arañas sociales y cleptoparásitas en el Instituto Smithsoniano de Investigación Tropical en Panamá, dirigió su atención a la evolución de las telas de araña, en particular de las telarañas circulares, para estudiar su construcción y funcionamiento.

1. *ARANEUS DIADEMATUS*, la araña protagonista de *La red de Charlotte*, de E. B. White, ha vencido las limitaciones que conlleva la seda húmeda para tejer una telaraña orbicular muy eficiente y avanzada desde el punto de vista estructural, como la que se ilustra a la derecha.



y matriz se oponen a la rotura. Un hilo estirado suele partirse porque una grieta en la superficie corta el hilo como si fuera una cuña. Las fuerzas que actúan a lo largo del hilo se concentran en la grieta y hacen que se hienda con velocidad creciente y penetre cada vez más profundamente en el material. Pero las grietas sólo avanzarán si no encuentran resistencia. Los cristales de la matriz gomosa se erigen en obstáculos que desvían y debilitan la fuerza de hendidura.

La seda bruta, líquida, se produce en grandes glándulas abdominales y se emite a través de espitas. En el gusano, una bomba de la cabeza de la larva libera un filamento doble. En las arañas, el filamento emerge de verdaderas torretas artilleras de los arácnidos: baterías de espitas dispuestas sobre tres series de hileras pares. (Las hileras evolucionaron a partir de pares de patas que pudieron haber mantenido los huevos del animal contra el cuerpo.) Puesto que la seda emana de fuentes pares, cada fibra consta de dos hebras.

Aunque queda mucho por conocer sobre las válvulas y los mecanismos productores de seda, debemos aceptar la intervención combinada de las fuerzas aplicadas por las presiones y de la composición molecular de la alfa queratina líquida para producir determinados tipos de seda. Los aminoácidos varían de la seda del gusano de la morera a la de las arañas, así como entre diferentes sedas del mismo arácnido.

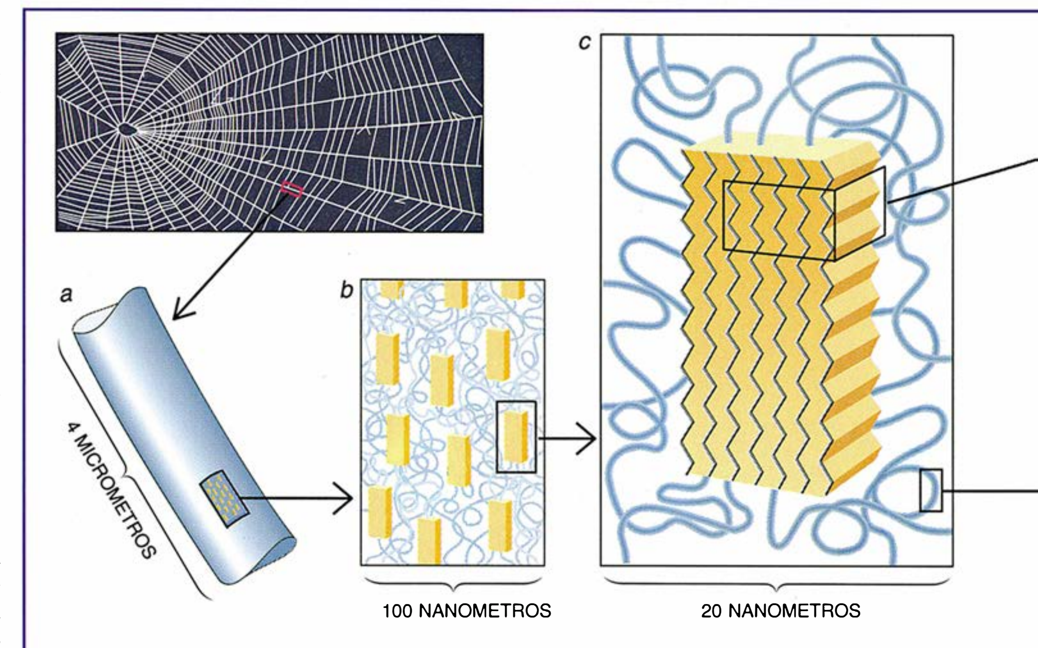
Las arañas parecen estar extraordinariamente capacitadas para ejercer algún tipo de control sobre su sistema de producción de seda; algunas, para modificar el filamento que están tejiendo, cambian diámetro, resistencia o elasticidad. Es probable que lo hagan controlando las válvulas y no la composición química de la seda. Si se precisa una seda radicalmente distinta, recurren a otra glándula. Y por citar un ejemplo, la hembra de la araña de jardín europea fabrica al menos siete sedas distintas.

En un futuro inmediato, el hombre podría quizás utilizar estas sedas variables de arañas para algo más que adminículos ópticos. Recientemente se han sintetizado los genes para estas sedas, se han expresado en microorganismos y se han patentado.

La evolución del sinnúmero de sedas de araña queda reflejada en la diversidad sorprendente de tipos de telas. Todos los patrones derivan de una simple malla de seda utilizada por las arañas ancestrales para tapizar madrigueras, excavadas en el suelo hace más de 380 millones de años. Presumiblemente estas arañas, como el fósil viviente *Liphistius*, podrían haber usado hilos que radiaban de sus madrigueras para que sirvieran de líneas señalizadoras y cables avisadores de viajeros incautos. (El tipo de viajeros de que se trataba está abierto a la especulación, porque en el Devónico los insectos empezaban justo a surgir.) Para la transmisión eficaz de las señales, estos hilos podrían haberse tendido a cierta altura, con postes de seda minúsculos para soporte de la línea. El tipo de cable avisador de los lifístidos podría remontarse muy atrás en la filogenia, pero no es en absoluto rudimentario en ciertas expresiones modernas: la suspensión de sus pocas hebras radiales resulta ingeniosa desde el punto de vista técnico.

A lo largo del tiempo, los cables avisadores dieron origen a trampas que consumían más seda. El patrón que teje la araña de tela en embudo (*Agelena labyrinthica*), por ejemplo, consta de una lámina fina y fuerte, mantenida tirante por cabos guía o contravientos laterales, superiores e inferiores. La araña se pasea sobre la lámina para recolectar las presas que han caído o saltado sobre la trampa; las vibraciones le alertan de la presencia y la situación de la presa.

Además, la telaraña de *A. labyrinthica* posee un mecanismo que amplifica los movimientos de las presas. Algunos filamentos se hallan tirantes siempre fuera de su lugar y vuelven a su nueva posición con un chasquido cuando se sueltan. Esta adaptación pudo haberse requerido para asegurar el éxito continuado en la captura del almuerzo: en la carrera de armamentos entre las arañas fabricantes de telas y sus presas, éstas procuran siempre refinar su estrategia para evitar caer en la trampa. Así, las escamas de mariposa se pegan fácilmente a los filamentos viscosos de las telas, pero se desprenden también con igual prontitud de la mariposa, permitiéndole escapar al tiempo que deja atrás una ringlera de escamas arrancadas y de seda inoperante.



Estructura de la seda de araña

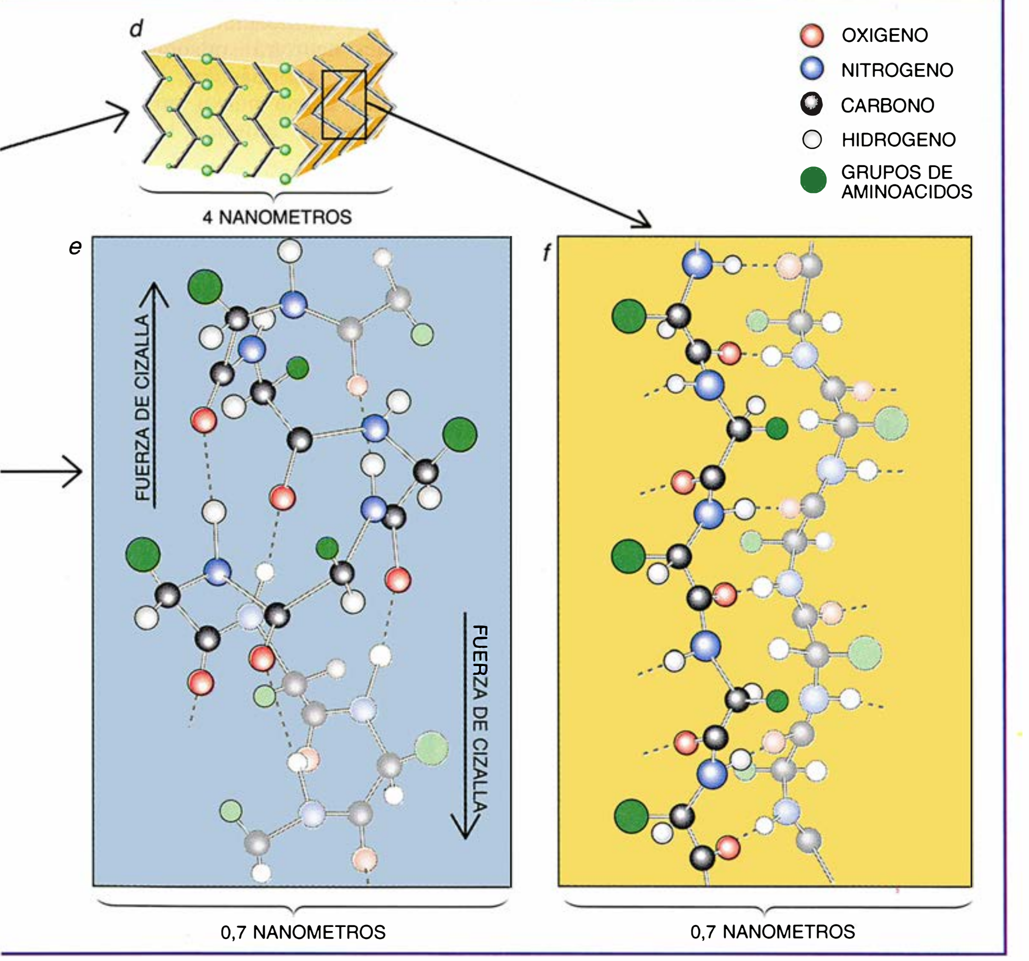
Visto en aumento, el hilo de araña (*a*) es un material compuesto de filamentos de cadenas de aminoácidos sin orden y de cristales ordenados (*b* y *c*). Cada cristal consta de grupos de aminoácidos de tamaño dispar y comprimidos en acordeón, es decir, en hojas plegadas beta (*d*). Los filamentos circundantes son hélices alfa; su desorden prieto confiere a la seda su elasticidad característica. Mientras se libera seda, intervienen fuerzas de cizalla (*e*) que actúan sobre hélices alfa. En consecuencia, sus enlaces de hidrógeno se rompen y se convierten en hojas plegadas beta (*f*), como demuestra la similaridad de los filamentos moleculares aumentados. La mayor parte de lo que se sabe acerca de la estructura molecular de la seda procede del gusano de seda. En esta ilustración, se supone que la seda de araña se asemeja a la del gusano de la morera.

Otro patrón fundamental es la telaraña aérea derribadora: complejo de filamentos tridimensional que hallamos en matorrales o setos. Se trata de estructuras de muy difícil control por parte de la araña, lo que resulta evidente cuando se compara el número de huéspedes cleptoparásitos en esas telarañas con los de otros tipos de telas. En las estructuras tridimensionales, los intrusos (a menudo, otras arañas) pueden ser muy comunes. Se desplazan con relativa impunidad para espigar pequeñas presas o incluso para robar grandes insectos delante mismo de los potentes colmillos del propietario.

Para asegurarse una pitanza regular, los tejedores de la mayoría de las telarañas tridimensionales acotan con precisión sus propias áreas de captura, regiones que pueden controlar con relativa facilidad. En una de esas telas, la de la viuda negra (*Latrodectes mactans*), hay hilos muy modificados de soporte inferior que constituyen el área de captura, un denso bosque de malla pegajosa. En sus extremos, las fibras tirantes están recubiertas con una cola viscosa. Tan pronto como se adhieren a un insecto que camine por el suelo, se rompe su contacto con el piso e izan a la víctima con el filamento retráctil.

Otras telas tridimensionales, como la de la araña de cúpula (*Neriene radiata*), incorporan láminas no pegajosas que sirven de área de captura. Esta araña se desplaza bajo su lámina cupuliforme para atacar a las presas que han caído sobre ella, detenidas en pleno vuelo por la maraña de filamentos superiores, dispuestos a modo de contravientos.

De los tres tipos de telas descritos, cada uno posee su propio *modus operandi*. Pero todos comparten idéntico principio básico: un insecto que ve cortada su marcha y cuya presencia se denuncia mediante vibraciones o cambios en la tensión de los filamentos estructurales. La tarea de la detención de la presa, de la disipación de su energía cinética, se acomete apartando o rompiendo hebras. Algo parecido al aviador que cae sobre un árbol: la resistencia y la elasticidad de las ramas, sus tensiones e interconexiones condicionarán cuán adentro de la bóveda llegará en su caída el infausto.

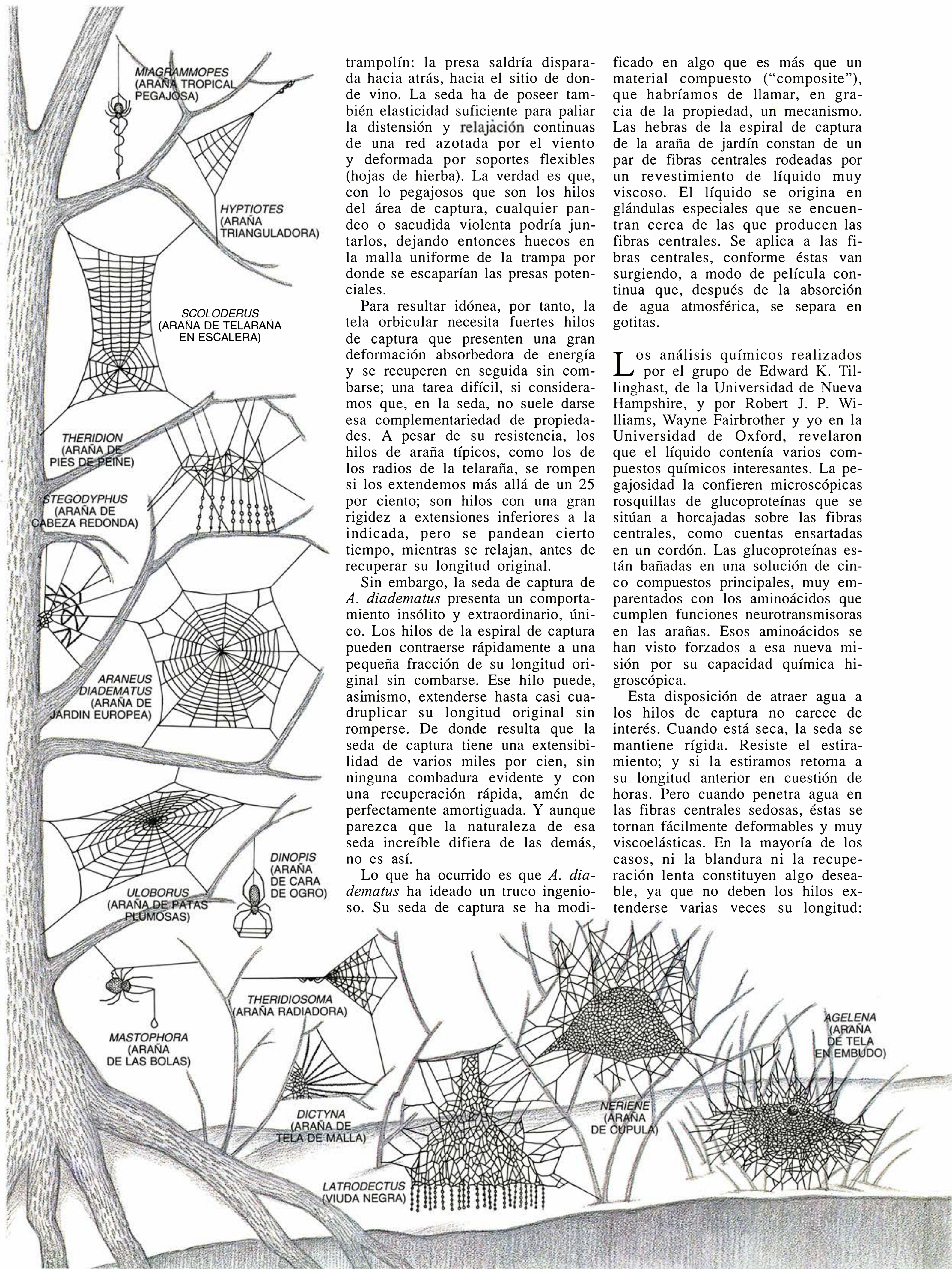


La espesura de hilos disipadores de energía en las telas tridimensionales falta en las telas circulares; a estas segundas pertenecen las tejidas por la araña de jardín europea. Las estructuras bidimensionales funcionan de manera muy distinta, y es en ellas donde se aprecia con mayor nitidez la coevolución de estructuras y materiales de construcción. Al no haber una maraña densa que detenga al insecto, bastaría con romper algunas hebras para proseguir su vuelo. De lo que se infiere que la tela bidimensional precisará materiales y arquitectura mucho más escogidos que los que se emplean en las tridimensionales.

De todos los patrones bidimensionales, el más conocido quizá sea la red polar tipificada en la tela circular u orbicular de la araña de jardín europea. Es una telaraña que nos es muy familiar. Hilos firmes y secos arrancan del centro, a modo de radios de rueda de bicicleta. Un filamento de seda pegajosa ensarta, en espiral, los radios. Las funciones de esta telaraña, y de cualquiera, son múltiples; por ejemplo, sistema de alerta contra los depredadores, alarma antirrobo y, para un macho que corteja, arpa y pista de baile. Pero su función dominante es la de actuar de trampa.

Se tratará de una buena trampa si cumple las siguientes prestaciones: poder detener al insecto que se mueve rápidamente (y que es comparable, desde la perspectiva de la telaraña, a un misil dirigido) y retenerlo el tiempo suficiente para que la araña pueda inspeccionarlo y morderlo. La estructura básica de la tela facilita el desarrollo de ambas funciones. Ahora bien, la telaraña circular, bidimensional, no puede atrapar a la presa disipando la energía de la víctima mediante hebras que se rompen, como hace la telaraña tridimensional; por cuyo motivo debe disipar y absorber la energía cinética del insecto a través de otro recurso: sacándole partido a las propiedades intrínsecas de la seda, en particular del hilo de captura.

Esta fibra es resistente en largas extensiones, porque no debe romperse, y muelle en cortas, porque no debe ofrecer ningún punto de apoyo al insecto atrapado. Su seda debe estirarse sin que se provoque una retracción elástica brusca; si así no fuera, pasaría lo que vemos en un



trampolín: la presa saldría disparada hacia atrás, hacia el sitio de donde vino. La seda ha de poseer también elasticidad suficiente para paliar la distensión y relajación continuas de una red azotada por el viento y deformada por soportes flexibles (hojas de hierba). La verdad es que, con lo pegajosos que son los hilos del área de captura, cualquier pandeo o sacudida violenta podría juntarlos, dejando entonces huecos en la malla uniforme de la trampa por donde se escaparían las presas potenciales.

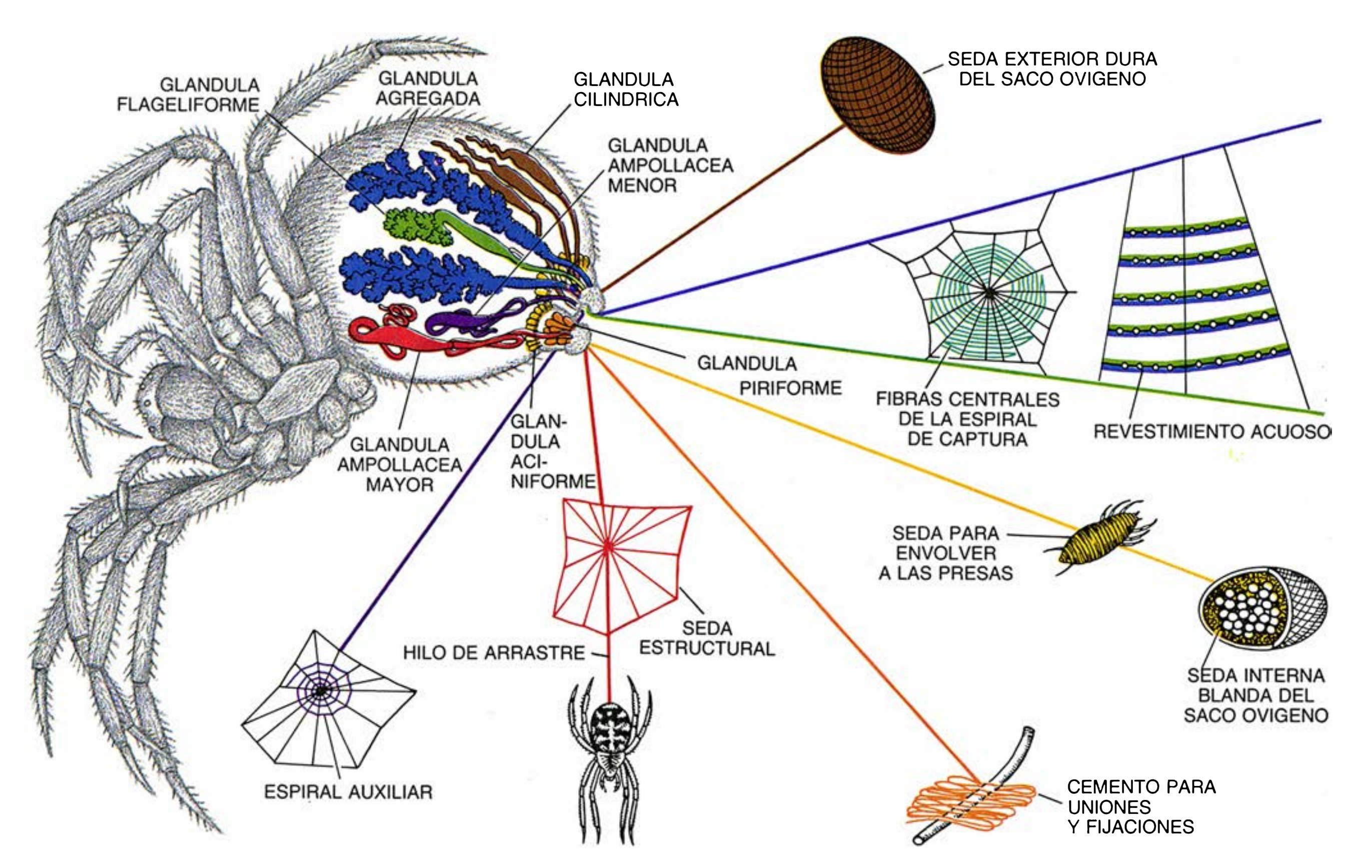
Para resultar idónea, por tanto, la tela orbicular necesita fuertes hilos de captura que presenten una gran deformación absorbedora de energía y se recuperen en seguida sin combarse; una tarea difícil, si consideramos que, en la seda, no suele darse esa complementariedad de propiedades. A pesar de su resistencia, los hilos de araña típicos, como los de los radios de la telaraña, se rompen si los extendemos más allá de un 25 por ciento; son hilos con una gran rigidez a extensiones inferiores a la indicada, pero se pandean cierto tiempo, mientras se relajan, antes de recuperar su longitud original.

Sin embargo, la seda de captura de *A. diadematus* presenta un comportamiento insólito y extraordinario, único. Los hilos de la espiral de captura pueden contraerse rápidamente a una pequeña fracción de su longitud original sin combarse. Ese hilo puede, asimismo, extenderse hasta casi cuadruplicar su longitud original sin romperse. De donde resulta que la seda de captura tiene una extensibilidad de varios miles por cien, sin ninguna combadura evidente y con una recuperación rápida, amén de perfectamente amortiguada. Y aunque parezca que la naturaleza de esa seda increíble difiera de las demás, no es así.

Lo que ha ocurrido es que *A. diadematus* ha ideado un truco ingenioso. Su seda de captura se ha modificado en algo que es más que un material compuesto ("composite"), que habríamos de llamar, en gracia de la propiedad, un mecanismo. Las hebras de la espiral de captura de la araña de jardín constan de un par de fibras centrales rodeadas por un revestimiento de líquido muy viscoso. El líquido se origina en glándulas especiales que se encuentran cerca de las que producen las fibras centrales. Se aplica a las fibras centrales, conforme éstas van surgiendo, a modo de película continua que, después de la absorción de agua atmosférica, se separa en gotitas.

Los análisis químicos realizados por el grupo de Edward K. Tillinghast, de la Universidad de Nueva Hampshire, y por Robert J. P. Williams, Wayne Fairbrother y yo en la Universidad de Oxford, revelaron que el líquido contenía varios compuestos químicos interesantes. La pegajosidad la confieren microscópicas rosquillas de glucoproteínas que se sitúan a horcajadas sobre las fibras centrales, como cuentas ensartadas en un cordón. Las glucoproteínas están bañadas en una solución de cinco compuestos principales, muy emparentados con los aminoácidos que cumplen funciones neurotransmisoras en las arañas. Esos aminoácidos se han visto forzados a esa nueva misión por su capacidad química higroscópica.

Esta disposición de atraer agua a los hilos de captura no carece de interés. Cuando está seca, la seda se mantiene rígida. Resiste el estiramiento; y si la estiramos retorna a su longitud anterior en cuestión de horas. Pero cuando penetra agua en las fibras centrales sedosas, éstas se tornan fácilmente deformables y muy viscoelásticas. En la mayoría de los casos, ni la blandura ni la recuperación lenta constituyen algo deseable, ya que no deben los hilos extenderse varias veces su longitud:



3. SEDAS DISTINTAS para funciones diferentes, producidas por la misma araña. *A. diadematus* puede tejer uno u otro tipo de seda con diversa composición en aminoácidos. La araña utiliza glándulas y espitas abdominales para fabricar siete tipos.

imagínese simplemente una telaraña en la que todos los hilos tuvieran esa propiedad y los estragos que causaría el peso de una araña que la atravesara. En consecuencia, todas las sedas ancestrales y la mayoría de las modernas son secas y pueden incluso resguardarse del agua mediante un delgado revestimiento oleoso.

Ahora bien, esos rasgos desventajosos se truecan en beneficio para la espiral de captura; los hilos pueden absorber mucha más energía cinética cuando están húmedos. Aunque ignoramos la química molecular del mecanismo en virtud del cual el agua confiere esa plasticidad, sí conocemos, en un plano macroscópico, de qué manera modifica el hilo de captura. Donald T. Edmonds, del Laboratorio Clarendon de Oxford, y yo encontramos que las gotitas líquidas servían de tornos o molinetes en miniatura: un sistema de manivela con cable y tambor. Las fibras centrales son el cable, y las gotitas del revestimiento acuoso constituyen el tambor. La potencia necesaria para el devanado la suministra la tensión superficial de las gotitas.

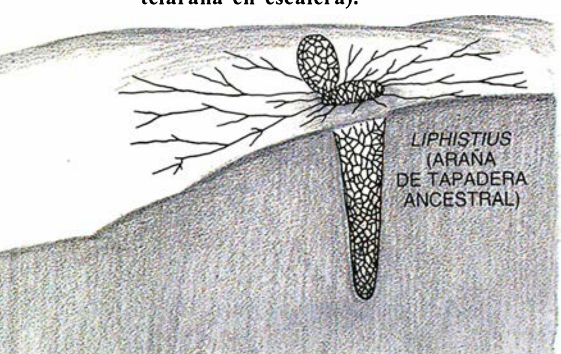
De su naturaleza plástica se infiere que las fibras centrales son blandas y muy viscoelásticas. Se deforman con pequeñas fuerzas de extensión y se recuperan con parsimoniosa lentitud. Pero basta la tensión superficial de las gotículas para devanar las fibras centrales, flexibles. La rápida sucesión de contracción y extensión del hilo pegajoso arrolla y desenrolla las fibras centrales del interior de las gotitas. Así, todo el sistema de fibras centrales y revestimiento se halla siempre bajo tensión, con lo que el hilo pegajoso se mantiene tirante. La energía aplicada por los vientos que azotan o por los insectos que se dan de bruces en la telaraña no es absorbida por la propia seda, sino por el sistema entero.

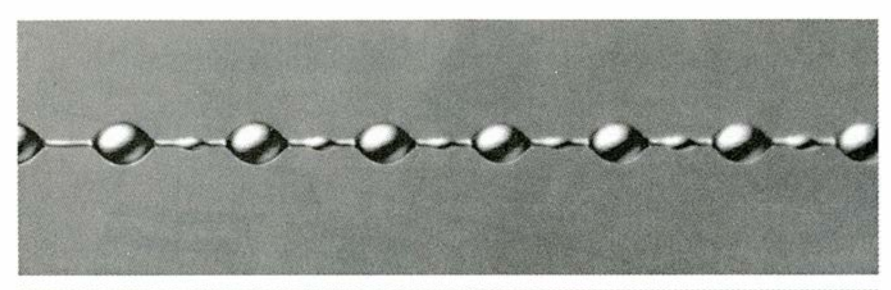
Las fibras centrales realizan parte del trabajo. En razón de su carácter plástico, que les asemeja a la goma reforzada, sacan partido directamente de la relación de dependencia de la elasticidad entrópica con respecto a la temperatura. Debido a que la energía cinética de la presa se convierte, en buena parte, en calor, el hilo se calienta. El caldeamiento aumenta la entropía, y en consecuencia las fibras centrales adquieren mayor resistencia. La energía absorbida de la desventurada presa refuerza el hilo de captura, gracias exclusivamente a ese truco de aplicar el revestimiento acuoso.

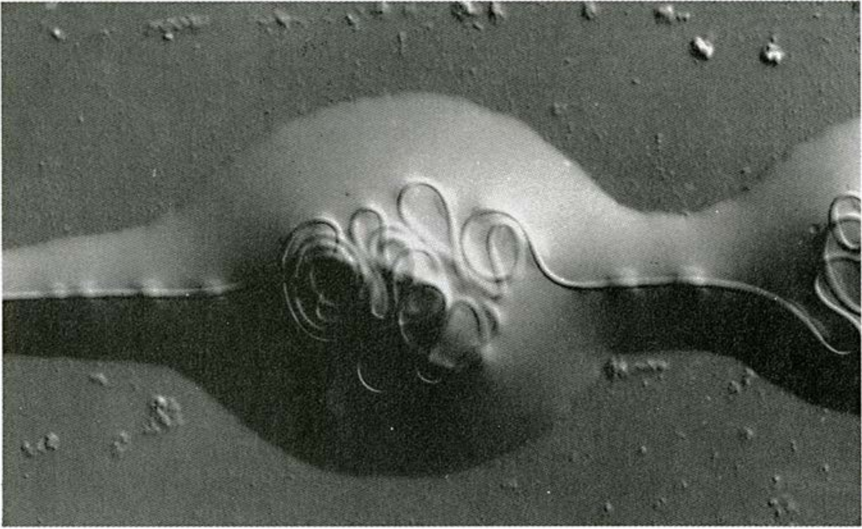
En el proceso de estiramiento, las fibras centrales plastificadas muestran al principio muy poca resistencia; es decir, durante el 300 por ciento inicial, aproximadamente. Desarrollan luego, de forma repentina, una resistencia creciente; en esta fase de su extensión se comportan como si se tratara de hilos secos. Tensadas ya del todo, las cadenas de polímeros entran en una transición vitriforme en que la disipación de energía viscoelástica sucede a la elasticidad entrópica.

El revestimiento comporta también una protección del hilo contra la aparición inmediata de grietas. Hasta una mínima imperfección de la superficie resulta en extremo peligrosa para un material sometido a tensión.

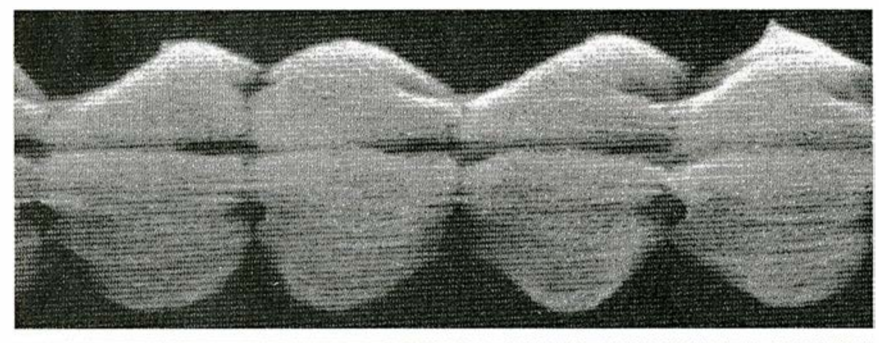
2. PATRONES DE TELARAÑAS; su forma diversa puede quedar reflejada en los nombres vulgares de sus creadoras (tal es el caso de la araña de cúpula o la de telaraña en escalera).

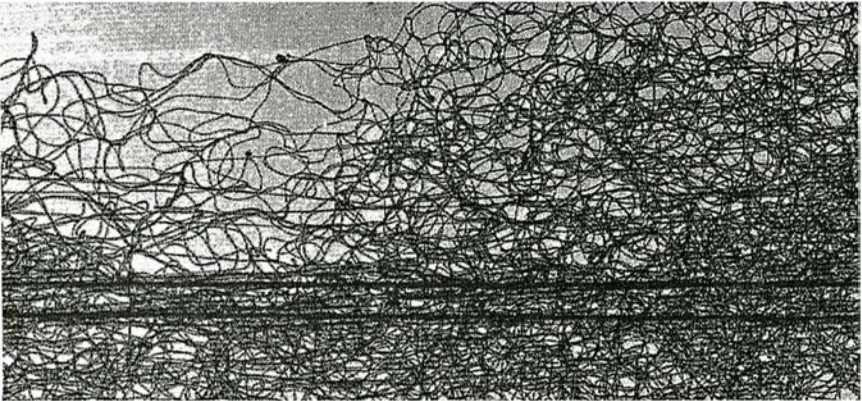






4. HILO DE CAPTURA de una araña ecribelada, como *A. diadematus*; está recubierto con una vaina acuosa (*arriba*), que aquí se muestra aumentada 100 veces. La tensión superficial en el interior de cada gota hace que las fibras centrales se arracimen, creando así un sistema de molinete, que se ilustra en su estado contraído (*abajo*), aumentado 300 veces.





5. HILO DE ARAÑA CRIBELADA, cardado en cientos de hebras (que se ilustran aumentadas 200 veces [*arriba*] y 1000 veces [*abajo*]) que se hinchan al ahuecarse. Los hilos no revestidos, cribelados, son tan pegajosos como los revestidos, ecribelados, pero cardar estas hebras requiere más energía y tiempo que revestirlas.

El hilo de araña, lo mismo que una cinta de tejido o de goma, se rompe más fácilmente si está mellado. Por tanto, el evitar la formación de grietas es imprescindible para reforzar la resistencia del filamento. El recurso general que la técnica emplea para proteger "cables", una fibra óptica de vidrio por ejemplo, es la pintura. Diríase que las arañas lo sabían y recubren con una fina capa de lípidos los hilos secos y, con un revestimiento acuoso, los hilos de captura. Para defenderlos contra bacterias y hongos, que podrían deleitarse con las nutritivas proteínas del revestimiento, las arañas incorporan fungicidas y bactericidas a las gotitas. (Esta cualidad antiséptica de la telaraña podría explicar su renombre como remedio popular para vendar las heridas.)

El invento evolutivo de la tela, relativamente económico (lo mismo en tiempo invertido en la elaboración que en material empleado), permitió a las que fabrican telarañas orbiculares, *Araneus* entre ellas, invadir lugares peligrosamente expuestos a los elementos. La telaraña se teje en un bastidor bidimensional con hilos de anclaje de cualquier longitud. Gracias a esa disposición, las arañas pueden salir a los espacios abiertos, dejando atrás la densa maraña de vegetación de soporte que requieren las arañas que fabrican telas tridimensionales. Significa ello que las arañas de telas bidimensionales pueden realmente volar, pese a carecer de alas. Y al habitar el espacio aéreo de bosques y claros pueden hacer presa en insectos voladores.

La radiación adaptativa de las telarañas bidimensionales que emplean seda plastificada y pegamento acuoso ha desembocado en una rica variedad de arquitecturas de la trampa y de métodos de captura. Las arañas han tenido tanto éxito en este nicho ecológico que, con excepción de las moscas salteadoras, los caballitos del diablo y las libélulas, son muy pocos los grupos de insectos capaces de disputarles el terreno. Construidas a bajo costo, las telarañas efímeras que resisten grandes distorsiones son también útiles en otros ambientes expuestos, como los prados, donde tampoco dejan de abundar las telarañas orbiculares.

Ni siquiera las telas orbiculares de un pequeño grupo de arañas muy distintas, aunque comparten el mismo patrón general, pueden competir con las proezas de *Araneus* a la hora

de capturar presas, porque no incorporan su seda plastificada y su sistema revolucionario de molinete. Estas arañas cribeladas, así llamadas por su hilera suplementaria en forma de placa, o cribelo, han ideado otras estrategias para mejorar la resistencia y la pegajosidad de sus hilos de captura. Dichas arañas, *Uloborus* entre ellas, emplean seda seca en todas sus telarañas bidimensionales, seda que es también muy especial. A partir de cientos de las más finas espitas que uno pueda imaginarse, agrupadas en el cribelo, estas arañas producen una banda de hilos sutiles y desnudos, de muchas hebras o en rastrillo. El diámetro del hilo no llega a los 0,05 micrometros, que hemos de comparar con el micrometro de diámetro que alcanza la seda de captura de las arañas ecribeladas. (Las arañas ecribeladas son las que, como *Araneus*, carecen de la placa cribelar ancestral y cuyos hilos están revestidos.)

La araña cribelada desliza los hilos por las púas de un fino peine situado en la canilla de su pata posterior. El peinado preestira y endurece los hilos o bien los carga electrostáticamente. Sea como sea, el rastrillado ahueca las fibras para así cumplir su función de resorte. En el interior del muelle hay fibras centrales mucho más gruesas y resistentes. Como las fibras rastrilladas están completamente secas, la pegajosidad de las telas habrá que atribuirla a fuerzas electrostáticas o al enmarañamiento de los apéndices y pelos de las presas.

La caída de un insecto estira, según se aprecia, los hilos centrales y los rastrillados, hasta que se rompen unos tras otros, absorbiendo así energía. Cientos de hilos rígidos actúan conjuntamente, con lo que consiguen mayor rendimiento. Al romper las hebras para neutralizar la energía, la telaraña cribelada funciona en principio igual que las telarañas tridimensionales secas, que enredan a la presa. Por ello, estos hilos son peores absorbedores de energía que los hilos revestidos de agua de las arañas ecribeladas, desventaja que se compensa, en parte, con una similar pegajosidad, si no mayor, y con una vida útil más larga de la telaraña. A pesar de estos elementos compensadores, las tejedoras cribeladas se ven sobrepasadas en número por sus primas ecribeladas por un factor de uno a 100, hablemos de especies o de individuos.

Esta manifiesta discriminación tiene sus raíces en las mismas consideraciones que rigen todos los proyectos de construcción: las económicas. Cuesta mucho más fabricar el hilo de captura de las arañas cribeladas. Centímetro a centímetro, requiere mayor cuantía de materia prima, en forma de proteína, e implica mayores costos de montaje, puesto que el peinar las hebras rastrilladas consume tiempo y energía. Expresado en proporciones, la araña cribelada cuadruplica el tiempo que emplea una ecribelada para producir la misma longitud de espiral de captura. Por consiguiente, aun cuando ambos tipos de hilo rindan por el estilo, el ecribelado resulta más eficiente porque proporciona un valor comparable a un menor coste.

Con sus chapuzas, las tejedoras de telarañas orbiculadas, como *A. diadematus*, han convertido de forma ingeniosa un material bueno, aunque limitado (seda básica, seca), en un fabuloso absorbedor de energía. El truco reside en las sustancias químicas higroscópicas: atraen el agua que plastifica la seda y suministra potencia al molinete que mantiene tirante el hilo de captura.

La invención de tan sorprendente mecanismo consolidó el rendimiento arquitectónico de la telaraña circular y permitió a las ecribeladas tejedoras desempeñar el importante papel que hoy en día ocupan en la mayoría de las cadenas alimentarias ecológicas. ¿Qué otra cosa cabría esperar de muchos millones de años invertidos en investigación y desarrollo? Después de todo, si admitimos la interpretación reciente de cierto fósil del Cretácico superior en el sentido de que se trata de una araña productora de telas orbiculares, nuestras hilanderas habrían tenido más de 180 millones de años para conseguir un trabajo perfecto.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SPIDERS: WEBS, BEHAVIOR AND EVOLUTION. Dirigido por William A. Shear. Stanford University Press. 1986.

THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF SPIDER SILK. John M. Gosline, M. Edwin Demont y Mark W. Denny en *Endeavour*, nueva serie, vol. 10, págs. 37-43; enero de 1986.

MODULATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF SPIDER SILK BY COATING WITH WATER. Fritz Wollrath y Donald T. Edmonds en *Nature*, vol. 340, n.º 6231, págs. 305-307; 27 de julio de 1989.

GLYCOPROTEIN GLUE INSIDE THE SPIDER WEB'S AQUEOUS COAT. F. Wollrath y E. Tillinghast en *Naturwissenschaften*, vol. 78, págs. 557-559; diciembre de 1991.

Corte de intrones y empalme de exones

Los factores que intervienen en la reacción de corte de intrones y empalme de exones del ARN son responsables de mantener la fidelidad de la secuencia e intervienen en la producción de ARNm parcialmente distintos

Montserrat Bach

El dogma central de la genética ha pasado al acervo común de conocimientos del hombre de la calle: el ADN se transcribe en ARN para su traducción en proteínas. Los procesos son, sin embargo, algo más complejos que esa secuencia lineal. En los últimos años se ha visto que la expresión de los genes codificadores de proteínas en eucariotas, células con núcleo diferenciado y cerrado en una membrana, abarca cuatro grandes etapas. En primer lugar, se procede a la síntesis nuclear del precursor del ARN mensajero (pre-ARNm) a partir de la hebra madre de ADN. Sin salirnos del núcleo, sigue luego la modificación y procesamiento del pre-ARNm. Se transporta, en tercer lugar, el ARNm maduro hasta el citoplasma para que allí se desarrolle, por fin, la síntesis de proteína en la maquinaria ribosómica.

Para la activación y represión de los genes codificadores de proteínas se requiere la unión de factores de transcripción (proteínas en su mayoría) a segmentos de ADN que se hallan próximos a la región que se transcribirá en pre-ARNm. Más aún: la transcripción viene regulada por los niveles de esos factores.

El ARN precursor del mensajero se une a ciertas proteínas nucleares para formar ribonucleoproteínas nucleares heterogéneas. El calificativo de heterogéneas responde a la amplia diversidad de tamaños que presentan, algo que resulta coherente con la longitud variable de los pre-ARNm. Desde hace ya casi tres lustros se sabía que ese ARN precursor sufría, una vez transcrito, varias modificaciones en el núcleo. En efecto, se altera el extremo 5' del pre-ARNm con la adición del nucleótido 7-metilguanosina y se corta el extremo 3' y se poliadenila; además, un 0,1 por ciento de todos los nucleótidos de adenosina se metilan, se les añade CH_3.

Las investigaciones llevadas a cabo entre 1977 y 1981 obtuvieron una serie de resultados experimentales que revolucionaron el conocimiento que se tenía del procesamiento del pre-ARNm y de la organización de los genes. Ya entonces podía deducirse la secuencia nucleotídica de un ARNm y, por consiguiente, la de los aminoácidos que conformaban una proteína. Averiguada la secuencia del ARNm, varios grupos se plantearon aislar el gen codificador de la proteína determinada para estudiar la regulación de la expresión de dicho gen. Esa estrategia general se aplicó a la investigación de varias proteínas y sus genes: inmunoglobulinas, albúmina y ovoalbúmina de clara de huevo.

Algunos experimentos anteriores habían conseguido resultados inesperados, de acuerdo con los cuales el ADN genómico de ciertas proteínas debía poseer inserciones que luego no aparecerían en el ARNm y, por ende, secuencias no codificadoras de proteínas. La identificación de la secuencia génica corroboró la hipótesis. Los segmentos de ADN que no aparecerán en el ARNm y, por tanto, no se traducirán en aminoácidos de la proteína, se llaman intrones. Exones son los segmentos que sí determinan la proteína. Ahora bien, el ácido ribonucleico precursor del ARNm posee ambos, intrones y exones; sufre un proceso de maduración durante el cual se eliminan los intrones, y origina el ARNm maduro que será el que se traduce en proteína.

Conviene dejar sentado desde un principio que la presencia de intrones en los genes no constituye una característica general, por más que aparezcan en la mayoría de los que codifican proteínas en los organismos eucariotas. A modo de botón de muestra, los genes de las histonas, interferones y muchos ARNm sintetizados por virus que infectan las células humanas no presentan intrones. La verdad es que no abundan en todos los eucariotas. Conforme descendemos en la escala evolutiva va cayendo el número de genes con intrones, y los intrones que se descubren suelen ser menores que los hallados en organismos más complejos; por ejemplo, los genes del citocromo *c* de células humanas y de rata presentan intrones, no así el citocromo *c* de levaduras. En las levaduras encontramos pocos genes con intrones.

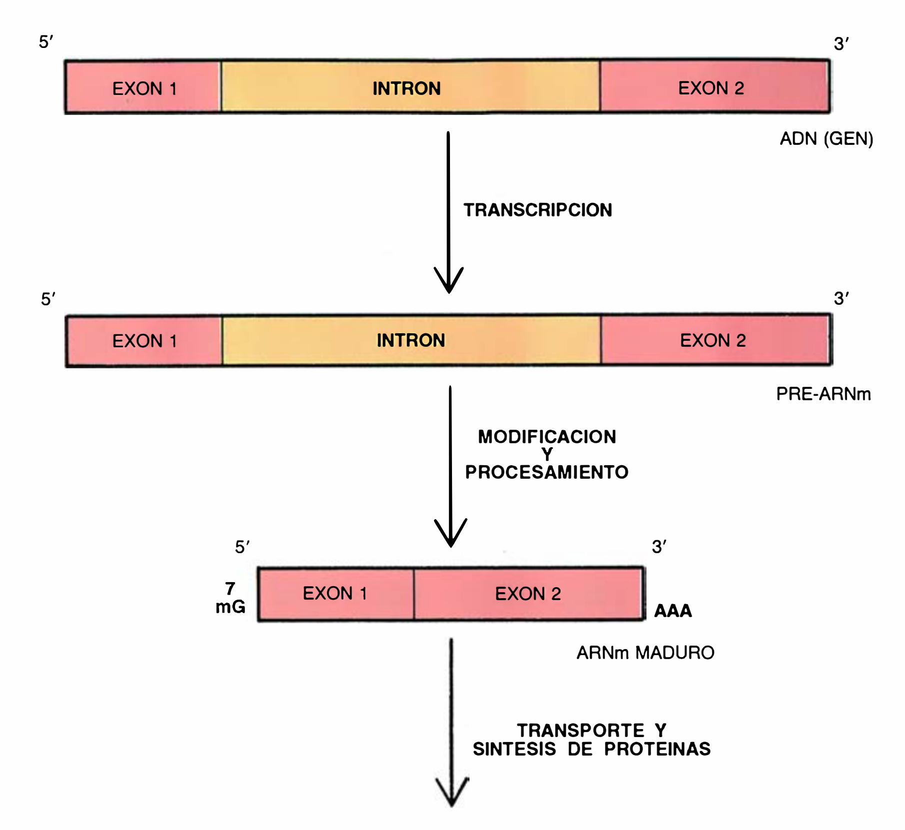
La longitud de los intrones de los eucariotas superiores varía bastante en un mismo gen. En el gen de la ovoalbúmina, por citar un ejemplo, hallamos siete intrones, que oscilan entre 250 y 1600 bases. Expuesto de manera general, podemos afirmar que cada gen contiene un número característico de intrones, cuyo tamaño oscila entre 30 y 60.000 bases.

¿Cómo ocurre el tránsito del estadio de pre-ARNm, dotado de intrones, al de ARNm, que los ha perdi-

MONTSERRAT BACH trabaja en el Centro de Investigación y Desarrollo que el Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) tiene en Barcelona. Su interés por el tema del artículo arranca de comienzos de los años ochenta. Tras doctorarse en 1986, estuvo completando su formación en el Instituto Max Planck de Berlín y en la Universidad Philipps de Marburgo.

do? Nos preguntamos por el mecanismo de corte y empalme ("splicing"), de corte de los intrones y de unión de exones. Debe actuar con suma precisión, pues si se cortase el intrón por un sitio inadecuado se formaría una proteína distinta, probablemente sin capacidad funcional. Veamos cómo.

Antes de detallar el conjunto de factores que intervienen en la reacción de corte y empalme, sépase que el pre-ARNm encierra una serie de señales características que indican por dónde ha de cortarse el intrón. Se trata de secuencias que coinciden en el mismo intrón y se han mantenido bastante bien a lo largo de la evolución de los mamíferos ("se han conservado"). En el punto de corte 5' hallamos el segmento de secuencia AG/*GU*RAGU, donde el dinucleótido *GU* es el que se conserva con mayor pertinacia y R designa cualquier purina. El dinucleótido *GU* inicia la secuencia intrónica. En el punto de corte 3' está la secuencia conservada C*AG*/G, donde el dinucleótido *AG* es el que persiste y cierra, además, la secuencia del intrón. Cerca del punto de corte 3' percibimos el tramo de pirimidinas, zona muy enriquecida en citosina y uracilo. En la zona 5' del tramo de pirimidinas hallamos otra región característica: la zona de ramificación.



1. GEN CODIFICADOR DE PROTEINAS que contiene intrones. A partir de la secuencia nucleotídica del gen se transcribe el precursor del ARNm. El precursor atraviesa varias modificaciones y un proceso de maduración antes de resultar en ARNm. El extremo 5' de la cadena nucleotídica se modifica en el 7-metilguanosina; el 0,1 por ciento de las adenosinas sufren metilación (se les agrega un radical CH_3); el extremo 3' de la cadena se corta y poliadenila. Se escinden y apartan, se cortan, los intrones y se hilvanan los exones en un proceso llamado de corte y empalme.

Para captar mejor el significado de la zona de ramificación, importa conocer antes la base química de la reacción de corte y empalme. Reacción en la que se distinguen dos etapas. En la primera, se produce el corte del extremo 5' del intrón y la guanosina del dinucleótido *GU* forma un enlace fosfodiéster con una adenosina que hay en el interior del intrón, cerca del tramo de pirimidinas; en virtud de ello, el intrón adquiere una estructura en bucle. Ese intrón-lazo se mantiene todavía unido al exón de la zona 3' del intrón. Ambos, el exón de la zona 5' libre del intrón-lazo-exón, son moléculas intermediarias de la reacción de corte y empalme.

En una segunda etapa se corta el exón que permanecía unido al intrón-lazo, y se une con el exón anterior en la secuencia. Durante esta segunda etapa se liberan el intrón en bucle y los exones unidos; la secuencia de exones unidos es el ARNm maduro. La adenosina responsable de la ramificación del intrón se denomina punto de ramificación y se aloja en la zona de ramificación, región que se ha mantenido (o conservado) y se ubica cerca del tramo de pirimidinas. La zona de ramificación se manifiesta, en los mamíferos, mediante la secuencia YNYURAY, donde Y designa una pirimidina, N cualquier nucleótido, R una purina y A es la adenosina del punto de ramificación. Una secuencia, por lo demás, que apenas si se ha mantenido en mamíferos, en tanto que se ha conservado casi a rajatabla en *Saccaromyces cerevisiae* (UAGUAAC), levadura en la que resulta imprescindible; en este microorganismo, la zona de ramificación no puede sufrir mutaciones sin acarrear graves consecuencias para la reacción de corte y empalme, riesgo del que están libres los mamíferos.

En las postrimerías de los años setenta, los trabajos de Joan Steitz y colaboradores, de la Universidad de Yale, y de John Rogers y Randolph Wall, de la facultad de medicina de la Universidad de California en Los Angeles, sugerían posibles formas de escindir los intrones. Con anterioridad se había observado que ciertos pacientes que sufrían enfermedades autoinmunes presentaban anticuerpos en la sangre que reaccionaban con componentes del núcleo de la célula. De ahí el apelativo de enfermedades autoinmunes: los anticuerpos, o autoanticuerpos, se dirigen contra componentes del propio organismo y no contra una sustancia que le sea extraña.

Steitz y Lerner, aplicando la técnica de inmunoprecipitación, prepararon células en cultivo que contenían varios componentes marcados radiactivamente. Extrajeron la mayoría de los componentes nucleares celulares; los incubaron con anticuerpos de enfermos reumáticos. Los anticuerpos reconocían las moléculas antigénicas, y se unían con ellas formando un complejo estable, susceptible de aislarse respecto de los otros componentes nucleares. Tras su análisis, Steitz y Lerner descubrieron que ciertos anticuerpos inmunoprecipitaban ARNnpU de los tipos U1, U2, U4, U5 y U6. (El término ARNnpU abrevia la expresión ARN nuclear pequeño enriquecido en uridina.)

Había más. Esos ARNnpU no se encontraban desnudos en el núcleo de la célula, sino que estaban asociados con proteínas características, formando el complejo RNPnpU, abreviatura de ribonucleoproteína pequeña cuyo ARN se halla enriquecido en uridina. Los autoanticuerpos reconocen, de hecho, algunas proteínas de las que integrarán el complejo.

Rogers y Wall, por un lado, y Steitz y colaboradores, por otro, observaron que había dos zonas del ARN nuclear pequeño enriquecido en uridina del tipo U1 que eran complementarias con las zonas terminales 5' y 3' de los intrones. Complementariedad que facilitaba el apareamiento de bases entre ARNnpU1 y esas zonas del intrón. Se sugirió entonces un modelo sencillo para escindir los intrones, en el que la ribonucleoproteína pequeña enriquecida en U1 serviría de puente de aproximación de los dos exones, amén de permitir el corte de los intrones y el empalme de los exones. Aunque hoy sabemos que ese modelo pecaba de excesiva simplicidad, siendo muchos los componentes que participan en el mecanismo de corte y empalme, los trabajos realizados aportaron una valiosa pista para desentrañar el proceso.

Los autoanticuerpos constituyeron entonces una buena ayuda (y la siguen prestando) para demostrar la necesidad de la intervención de las RNPnpU en el mecanismo de corte y empalme. Si retiramos esas ribonucleoproteínas de extractos nucleares mediante inmunoprecipitación con anticuerpos, esos extractos pierden la capacidad de realizar la reacción de corte y empalme. Dicho de otro modo, los anticuerpos extraen componentes esenciales del mecanismo de corte y empalme.

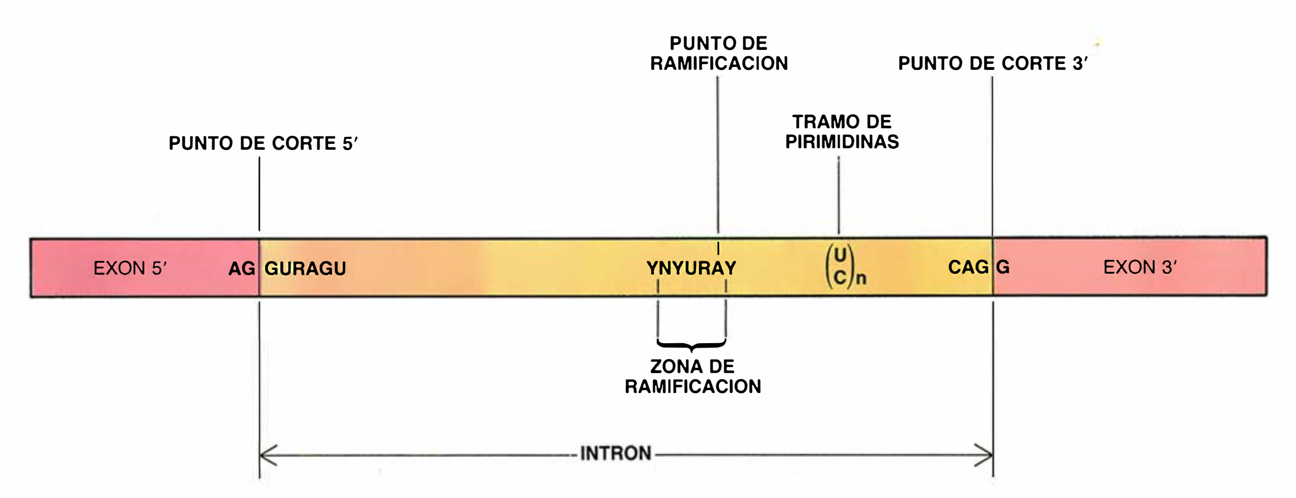
Para proceder a esa reacción, proteínas y ARN se asocian al pre-ARNm y crean un complejo grande con múltiples componentes. La revista ha llamado en otras ocasiones a ese complejo con misión de corte e hilván "somito cirujano" ("spliceosome" en inglés). Consta, por lo menos, de una cincuentena de proteínas y de ARN nucleares pequeños enriquecidos en uridinas de los tipos U1, U2, U4, U5 y U6. Se desconoce todavía cuántas proteínas, de ese medio centenar presente en el complejo, se asocian al pre-ARNm en forma de RNPnpU, aunque todo parece indicar que superará la cifra de 25.

Hemos dicho que las ribonucleoproteínas son entidades compuestas de ARN nuclear pequeño y de proteínas. Se caracterizan por la presencia del nucleótido trimetilguanosina (m_3G) en la zona terminal 5'. Dato que reviste interés porque facilita la clasificación de los ARN mediante el uso de anticuerpos anti-m_3G: si un ARN nuclear pequeño es inmunoprecipitable por los anticuerpos anti-m_3G, significará que el ARN será del tipo U. Hasta el momento se han detectado 13 ARNnpU en células humanas, y hay pruebas de que existen más tipos, aunque minoritarios con respecto a los mayoritarios citados antes. Detallémoslo.

Los ARNnpU U1-U6 son los más abundantes en el núcleo de la célula. De ellos, en el mecanismo de corte y empalme intervienen los tipos U1, U2, U4, U5 y U6. El ARNnpU6 no contiene la estructura m_3G en la zona terminal 5', sino que presenta otra modificación distinta, la de trifosfato de monometilguanosina (MeGTP); este ARN nuclear pequeño y enriquecido en uridina del tipo U6 se halla asociado, mediante apareamiento de bases, al ARNnpU4, que sí contiene la estructura trimetilguanosina; por consiguiente, si intentamos aislar el ARNnpU4 con los anticuerpos anti-m_3G, coaislamos también el ARNnpU6. Debido a esta asociación, el ARN nuclear pequeño y enriquecido en uridina del tipo U6 se inscribe también en la familia de los ARNnpU, interacción que se expresa a través de la razón U4/U6.

Los ARNnp de tipo U mayoritarios se hallan asociados siempre a proteínas. El complejo forma cuatro partículas, de acuerdo con el tipo de ARN de que estemos hablando; son éstas: RNPnpU1; RNPnpU2, RNPnpU5 y RNPnpU4/U6. La fracción proteica de la asociación posee una parte común, es decir, se trata de proteínas comunes a las cuatro partículas, y una fracción específica, o proteínas características de cada clase. Las proteínas comunes a las cuatro partículas se denominan *B'*, *B*, *D1*. *D2*, *D3*, *E*, *F* y *G*. Proteínas específicas de RNPnpU1 son *A*, *C* y una tercera clasificada por su peso molecular de 70 kilodaltons. La partícula RNPnpU2 contiene las proteínas *A'* y *B"*; la partícula U5 presenta ocho proteínas específicas, que se conocen por su peso molecular: 200 kilodaltons (kDa), 116 kDa, 52 kDa, 40 kDa y 15kDa. No se han detectado proteínas específicas para la partícula RNPnpU4/U6.

En el laboratorio de Reinhard Lührmann, del Instituto de Biología Molecular y Oncología de la Universidad Philipps de Marburgo, obtuvimos, bajo condiciones experimentales, ribonucleoproteínas del tipo U1,



2. SECUENCIAS DEL INTRON importantes para el mecanismo de corte y empalme. Persisten en los procesos hereditarios de mamíferos. El dinucleótido *GU* representa la zona terminal 5' del intrón; el dinucleótido *AG*, la terminal 3' del intrón.

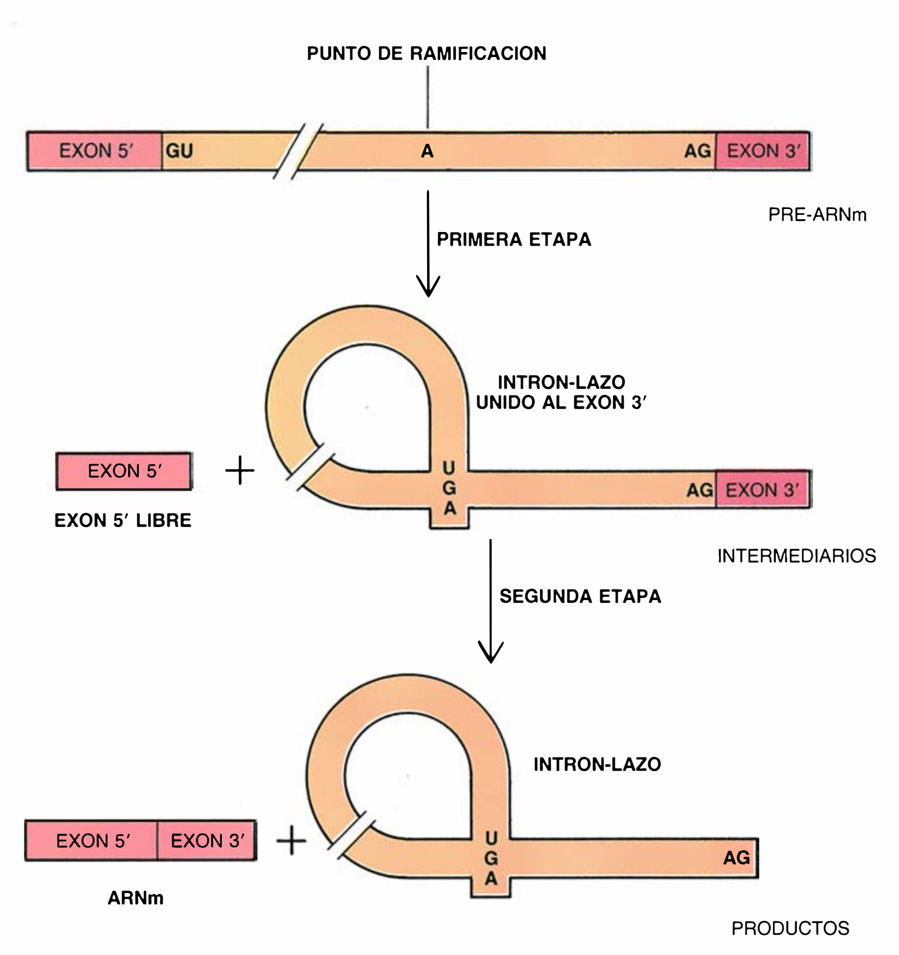
U2 y U5 que portaban sólo las proteínas comunes, cuya forma también común y redondeada se distinguía al microscopio electrónico. Esa esfera compartida constituye el cuerpo central de las RNPnpU.

Por el método de que nos servimos para obtener esas cuatro pseudopartículas debiéramos considerarlas meros artefactos, pero cabe la posibilidad de que existan estructuras análogas de ribonucleoproteína de tipo uridina en el citoplasma. En el curso de la investigación se obtuvieron también partículas nativas, es decir, las que portan proteínas comunes y específicas; y, en ellas, el cuerpo central de las RNPnpU, percibiéndose además que del núcleo central emergían varias protuberancias. Puesto que las protuberancias sólo aparecen en el microscopio cuando hay proteínas específicas, infiérese que éstas serían las responsables de tales estructuras.

Se espera que cada una de esas cuatro ribonucleoproteínas posea una función específica en el mecanismo de corte y empalme, función de la que en cierto modo fueran responsables las proteínas específicas. La configuración en protuberancia pudiera facilitar la interacción entre proteínas específicas de las RNPnpU y otros factores de corte y empalme, la interacción entre distintas ribonucleoproteínas o, por último, la interacción con el precursor del ARN mensajero.

El conocimiento de la estructura de las RNPnp de tipo U1, U2, U5 y U4/U6 no nos permite todavía asegurar qué función precisa realiza cada una durante la reacción de corte y empalme. Esas cuatro partículas son esenciales para dicha reacción, pero no son los únicos factores que intervienen. A mayor abundamiento, no se ha conseguido todavía que un precursor de ARNm procese sus intrones en presencia exclusiva de las cuatro RNPnpU para dar lugar al gran complejo que realiza el mecanismo de corte y empalme, esto es, el "somito cirujano". Se ignora si otras ribonucleoproteínas minoritarias participan también en esa maduración del ARN.

En la reacción de corte y empalme desempeñan un papel decisivo las zonas más o menos conservadas del intrón. Se trata, lo vimos ya, de regiones efectoras o diana, donde se engarzan ribonucleoproteínas y otros factores. El precursor del ARNm no está desnudo en el núcleo, sino que se asocia, tras su formación y de manera inmediata, con otras proteínas para crear ribonucleoproteínas nucleares heterogéneas (RNPhn). Años atrás se creyó que esas proteínas tendrían una función de empaquetamiento, protección o transporte de pre-ARNm, pero más tarde se demostraría que algunas de las proteínas de las RNP heterogéneas podrían ser también esenciales para el mecanismo de corte y empalme.



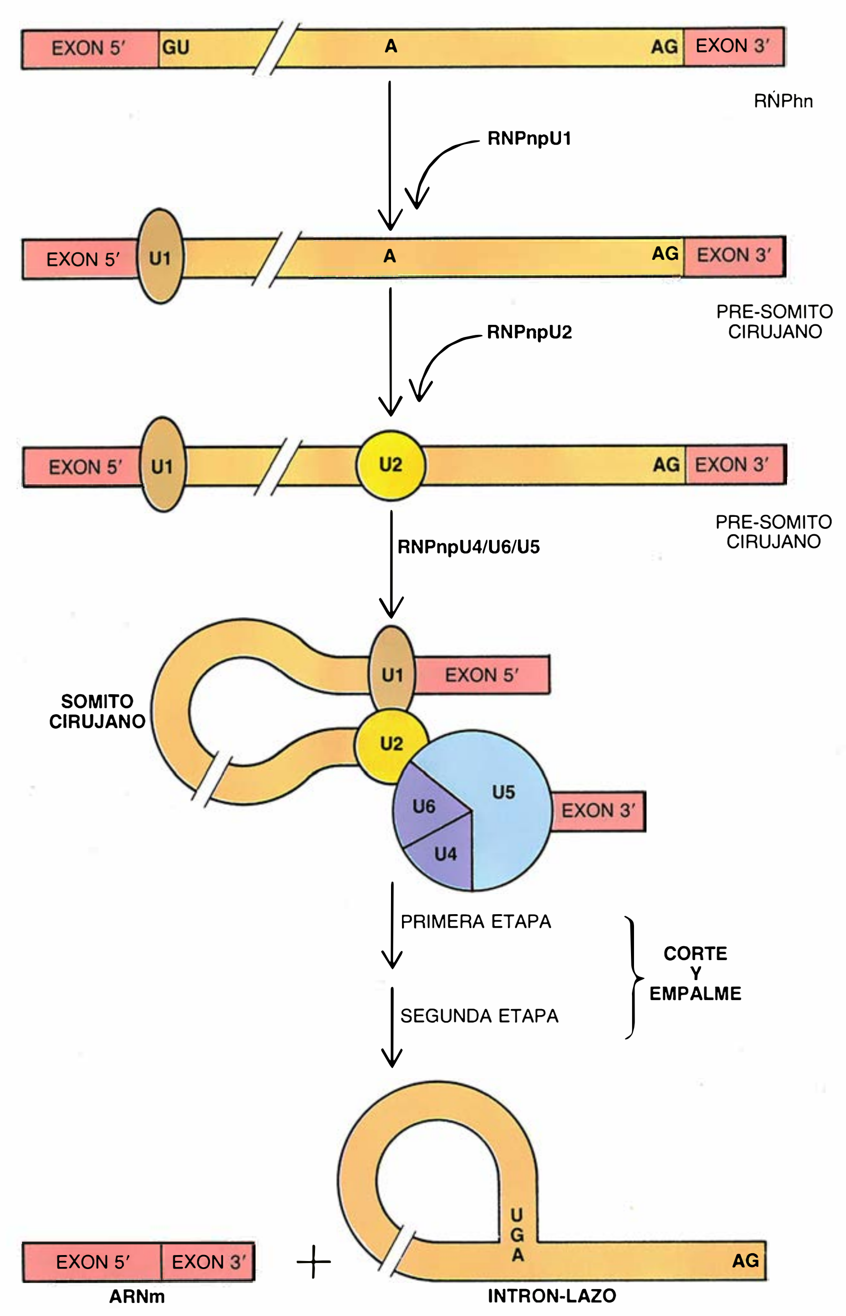
3. DOBLE ETAPA de que consta la reacción de corte y empalme. En la primera, se forma un enlace fosfodiéster entre la guanosina del punto de corte 5' del intrón y la adenosina del punto de ramificación. Esa reacción origina el exón libre 5' y el intrón en forma de lazo o bucle todavía unido al exón 3'. Ambas moléculas son compuestos intermediarios de la reacción. En una segunda etapa, se libera, del bucle, el exón 3'; se hilvanan entonces los dos exones. Dos son los productos finales de esta etapa: el ARNm maduro y el intrón en bucle.

La RNPnp del tipo U1 se une a la zona terminal 5' del intrón. Esta unión se realiza mediante apareamiento de bases entre la zona terminal 5' del intrón y la zona terminal 5' del ARN del tipo U1 de la partícula. Los experimentos recientes han demostrado que el polipéptido específico *C* de la RNPnpU1 es necesario para que dicha unión se realice, siendo éste el primer ejemplo donde se pone de manifiesto que las proteínas de las ribonucleoproteínas del tipo uridina participan en la función.

La unión de RNPnpU1 a la zona terminal 5' del intrón no requiere energía, es decir, ATP. Parece también que la ribonucleoproteína pequeña del tipo U2 interacciona mediante apareamiento de bases de una zona del ARN de la partícula con la zona de ramificación del intrón. Esa unión requiere, en humanos, la presencia del factor auxiliar de la RNPnpU2, ATP y el tramo de pirimidinas. Por su parte la ribonucleoproteína de tipo U4/U6 y la de U5 no se incorporan al precursor del somito cirujano, sino que existe una asociación previa de la RNPnpU4/U6 con la RNPnpU5, formando un solo complejo con ambas partículas, la formación del cual necesita también ATP.

No hay pruebas de que el complejo RNPnpU4/U6/U5 interaccione, mediante apareamiento de bases, con el precursor del ARNm, si bien varios resultados experimentales res-

paldan la idea de que se encamina hacia regiones de la zona terminal 3' del intrón. Otros factores, cuya caracterización desconocemos, se incorporan al precursor del "somito cirujano" para originar dicho corpúsculo de corte y empalme. Algunos experimentos parecen indicar que las ribonucleoproteínas de los tipos U4 y U1 abandonan el somito cirujano en cuanto comienza la reacción de corte y empalme, aunque los resultados difieren según sean las técnicas de detección.

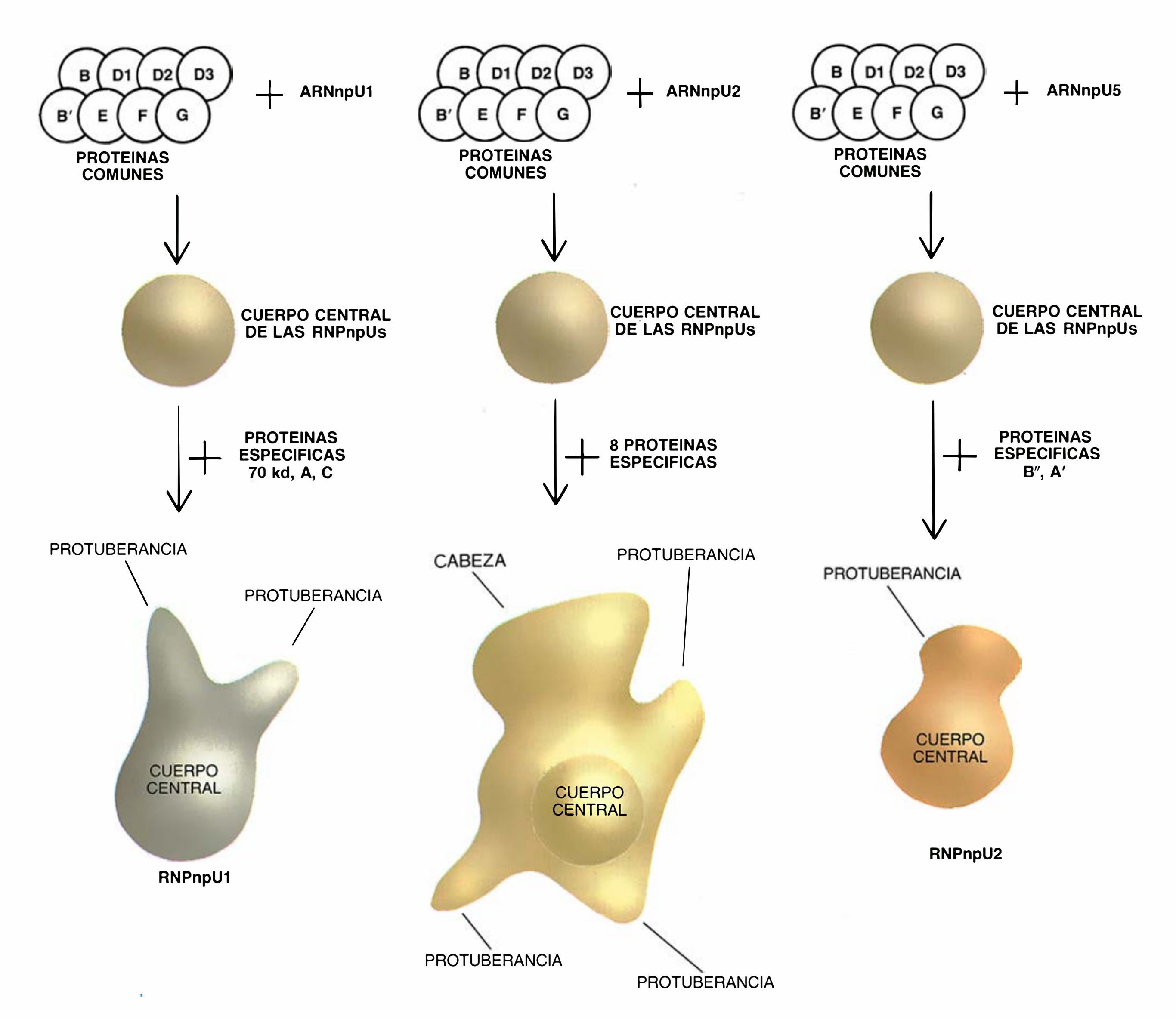


4. FORMACION DEL SOMITO CIRUJANO mediante la incorporación de varias ribonucleoproteínas al precursor de ARNm. Las RNPnp involucradas son de tipo U1, U2, U5 y U4/U6. Llamamos somito cirujano ("splicesome") al corpúsculo así formado en razón de la misión de corte y empalme que cumple. El precursor de ARNm se asocia también a otras proteínas para dar lugar a ribonucleoproteínas heterogéneas (RNPhn); en la figura se ha omitido la unión de las proteínas de las RNPhn por razones de claridad. La RNPnp de tipo U1 se agrega a la zona 5' del intrón sin requerir energía (ATP); la de tipo U2 lo hace en la zona de ramificación con la ayuda de otro factor y de ATP; la partícula de tipo U4/U6 se asocia con la de tipo U5 para formar, juntas, un complejo que requiere ATP y que se encamina hacia la zona terminal 3' del intrón. Otros factores se asocian para crear el somito cirujano: un gran complejo de proteínas y ARN. En este corpúsculo se realizan las dos etapas del mecanismo de corte y empalme que elimina los intrones e hilvana los exones.

Seguimos sin conocer qué episodios desencadenan el proceso de corte de intrones y empalme de exones en el interior del corpúsculo ("splicesome"). Revestiría capital interés descubrir de qué manera la zona terminal 5' del intrón se acerca a la zona de ramificación para la formación del intrón-lazo; averiguar, asimismo, qué factores mantienen el exón libre del intrón en el interior del somito cirujano evitando que se difunda; identificar qué componentes del corpúsculo cirujano intevienen en el acercamiento de los dos exones para realizar el último paso de la reacción; y dilucidar, por último, si existen, entre estos factores, enzimas que realizan la reacción o bien si tales factores se limitan a conferir una estructura óptima para que se desarrollen los pasos de la reacción química.

Las levaduras constituyen una herramienta poderosa para el estudio del mecanismo de corte y empalme. Permiten, por un lado, alterar un gen e introducirlo de nuevo en ese microorganismo para estudiar qué efecto ejercen las mutaciones en la función de la proteína determinada por el gen. La posibilidad de aprovechar esa técnica para el estudio del mecanismo de corte y empalme resulta altamente sugestiva. Si se consigue aislar un gen codificador de un factor que intervenga en el mecanismo de corte y empalme (proteínas o ARN nuclear pequeño del tipo U), podremos manipularlo (mutarlo) e introducirlo luego en la célula de levadura. Sabremos entonces si la mutación ejerce o no efecto alguno en el mecanismo de corte y empalme.

Tal ha sido la estrategia seguida con los genes de los ARNpnU de la especie *Saccharomyces cerevisiae*, que ha servido para demostrar la necesidad de tales ARN en la reacción de corte y empalme. Si no se ha identificado todavía el gen deseado, el sistema ofrece una ventaja ante otros casos similares: los mutantes *prp* (mutantes del procesamiento del precursor del ARNm). Se trata de cepas celulares que se obtienen por mutagénesis directa con agentes químicos; se seleccionan porque su crecimiento es sensible a la temperatura de 37 grados C. Las cepas mutantes se distinguen por un mecanismo viciado de corte y empalme, prueba de que algunos genes mutados se hallaban involucrados directa o indirectamente en el mecanismo de corte y empalme de los precursores del ARNm.



5. CUERPO CENTRAL Y PROTUBERANCIAS de la ribonucleoproteína de tipo U1. De manera artificiosa se obtuvo una pseudopartícula U1 que sólo contenía los péptidos comunes. Al microscopio electrónico, esa pseudorribonucleoproteína presenta un cuerpo central, estructura que poseen también U2, U5 y U4/U6, cuando estas partículas contienen sólo las proteínas comunes. La U1 que porta polipéptidos comunes y los suyos específicos (70, *A* y *C*) presenta dos protuberancias que emergen del cuerpo central. De lo que se infiere que las protuberancias estarían constituidas por polipéptidos específicos.

En un paso ulterior se aísla el gen de interés. Esta segunda estrategia ha permitido aislar genes esenciales para el mecanismo de corte y empalme, amén de caracterizar las proteínas que determinan. Así ha ocurrido en el caso del producto del gen *prp*8, que codifica una proteína de 260 kDa en levadura, cuya homóloga se ha caracterizado también en células humanas.

Además de las facilidades de manipulación que ofrecen, estos microorganismos eucariotas ayudan a entender cómo se ha ido manifestando el mecanismo de corte y empalme a lo largo de la evolución de las especies. Por lo que parece, se ha mantenido bastante constante: el de las levaduras se acerca mucho al de las células humanas. Y, así, vemos que también existen, en levaduras, partículas de ribonucleoproteínas del tipo U, cuyos ARNnpU contienen la estructura m_3G. El tamaño y estructura del dímero U4/U6 se ha conservado desde levaduras hasta células humanas; en aquéllas se ha descubierto la presencia del corpúsculo cirujano, cuya formación cursa de manera análoga a la estudiada en mamíferos.

Pero existen diferencias entre ambos sistemas en lo concerniente al mecanismo de corte y empalme. Las levaduras de la especie *S. cerevisiae* poseen pocos genes con intrones, y éstos tienden a ser pequeños; las mutaciones en las zonas conservadas de los intrones de *S. cerevisiae* inactivan el mecanismo de corte y empalme. En cambio, mutaciones similares en intrones de mamíferos sí permiten la formación de somitos cirujanos mediante la activación de zonas alternativas; de ello se infiere, pues, que los intrones de mamíferos presentan una mayor versatilidad.

Los ARNnp de los tipos U1 y U2 son, en *S. cerevisiae*, mayores que en sus homólogos de mamíferos y, por ende, su estructura difiere también. El ARNnp del tipo U5 de la levadura presenta inserciones de nu-

cleótidos, de las que carece su correspondiente humano. Existen, sin embargo, muchas zonas y estructuras de los ARNnpU1, U2 y U5 que se se han conservado a lo largo de la escala evolutiva, de las levaduras a los humanos, regiones que, además, revisten especial interés aquí.

En cuanto a los factores proteicos que intervienen en el mecanismo de corte y empalme, se desconoce cuántos se han mantenido de levaduras a células humanas, aunque ya se sabe de uno que comparten ambas especies: la proteína de 260kDa antes mencionada. La investigación debe proseguir, a propósito de ello, en el estudio del precursor de ARNm.

En efecto, desde el momento en que un gen presenta un intrón, se abre la posibilidad de que determine proteínas parcialmente distintas o, lo que es lo mismo, de que el precursor del ARNm sufra un mecanismo alternativo de corte y empalme. A lo largo de ese proceso, se puede cortar y apartar el intrón de la manera acostumbrada para dar lugar a un ARNm sin ese segmento nucleotídico o bien puede permanecer en el ARNm maduro; en el segundo caso, el intrón se convierte en exón y codifica los aminoácidos correspondientes originando una proteína alternativa a la que se desarrolla a partir del ARNm del primer caso.

Algo parecido podemos afirmar de los exones, que pueden escindirse con los intrones en el proceso de corte de éstos, y así aparecen también proteínas alternativas. El mecanismo alternativo de corte y empalme produce efectos varios en las proteínas: desde la codificación de proteínas isomorfas (por ejemplo, unas ancladas en la membrana, otras segregadas al exterior) hasta la modificación de la actividad proteica, pasando por la anulación de su función. El mecanismo alternativo de corte y empalme puede, también, alterar la estabilidad del ARNm.

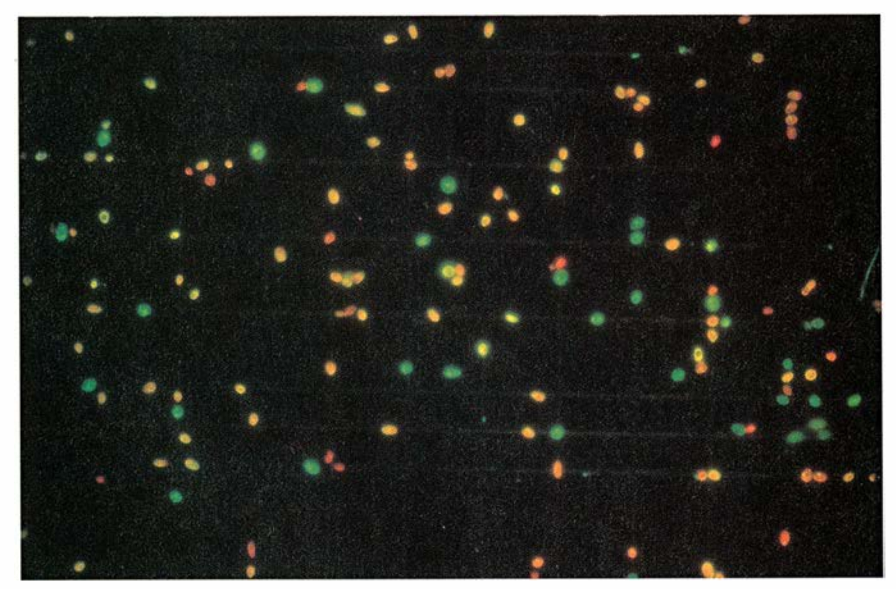
A medida que ascendemos en la escala evolutiva, desde los virus hasta el hombre, aumenta el número de genes que ofrecen mecanismos alternativos de corte y empalme. A mayor número de intrones de un gen, mayor posibilidad de combinación entre intrones y exones. Si un gen consta de n exones susceptibles de sufrir un mecanismo alternativo, habrá la posibilidad de codificar 2^n proteínas isomorfas. Obviamente no se sintetizarán todas las proteínas posibles, sino sólo cierto número de ellas.

Por ello, una de las cuestiones centrales que se plantea el investigador de los mecanismos de corte y empalme que dan origen al ARNm es el que concierne a la selección de los intrones y los exones que lo formarán. De acuerdo con los datos disponibles, se piensa en una selección modulada por factores específicos (de tejido, de desarrollo, etcétera) y por factores generales (las partículas ribonucleoproteicas, por ejemplo), sin olvidar el papel de la estructura del precursor del ARNm y las variaciones en las secuencias efectoras del intrón.

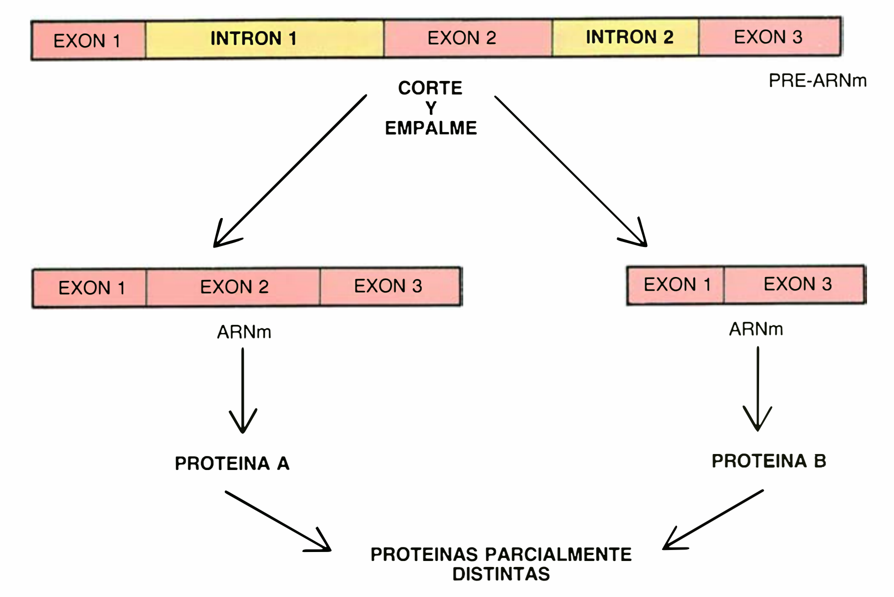
Existen otros tipos de mecanismo de corte y empalme, es decir, del que sufre el precursor del ARN. Hay uno, por ejemplo, que se realiza *in vitro* en ausencia total de proteínas, lo que constituyó a su vez una de las primeras pruebas de la función catalítica del ARN. Por analogía con las enzimas (proteínas catalíticas) al ARN catalítico se le denomina ribozima, y, mecanismo de autocorte y autoempalme, al proceso correspondiente. Esa reacción sobre sus propios intrones se ha descubierto en el núcleo de algunas algas (precursor de ARN ribosómico), mitocondrias de hongos, cloroplastos y mitocondrias de algunas plantas y en ciertos bacteriófagos. Los precursores del ARN que poseen ese tipo de intrón en tales orgánulos pueden ser de las tres clases: precursores de ARN ribosómico, ARN de transferencia y ARNm, aunque en el último caso dicho precursor no se localiza en el núcleo. Los intrones del ARN que sufren la reacción autocatalítica se distinguen claramente de los intrones de los procesos de corte y empalme que dependen de las ribonucleoproteínas de tipo U.

Los miembros de la familia de partículas ribonucleoproteicas no limitan su función a participar en el mecanismo de corte y empalme del precursor del ARNm nuclear. La RNPnpU7, por ejemplo, constituye un factor necesario para el procesamiento de la zona 3' de los precursores de ARNm de las histonas. La partícula U11 puede participar en la escisión y poliadenilación de la zona 3' del precursor de ARNm. Las partículas U3, U8 y U13 se hallan en el nucleolo, donde podrían intervenir en el procesamiento del precursor de ARN ribosómico.

¿Por qué unos genes contienen intrones y otros no? Se desconoce si en un comienzo abundaban los intrones en los genes que luego se irían perdiendo, o si el proceso seguido fue el de la adquisición paulatina de intrones por los genes en el curso de la evolución. Sabemos que las bacterias actuales, procariotas, suelen carecer de intrones, pero no podemos descartar la posibilidad de que los tuvieran bacterias ancestrales, que perdieron ante la inutilidad adaptativa de los mismos. Los intrones, en ese contexto de razonamiento, serían entes fósiles sin función.



6. CULTIVO de *Saccharomyces cerevisiae*. Además de las facilidades de manipulación que ofrecen, estos organismos eucariotas ayudan a entender cómo se ha ido manifestando el mecanismo de corte y empalme a lo largo de la evolución de las especies.



7. CORTE Y EMPALME ALTERNATIVO. El proceso de corte y empalme alternativo puede generar dos ARNm maduros: uno que ha perdido el exón 2 juntamente con los intrones y otro que conserva el exón 2. La traducción de estos ARNm dará lugar a dos proteínas parcialmente distintas (isomorfas).

Pero la versatilidad que los intrones confieren a los genes mueve a pensar que sí pueden cumplir una misión en la síntesis de proteínas. El gen dotado de intrones puede amplificar su expresión; de un gen con intrones se transcribe un precursor de ARNm que, a su vez, puede originar, mediante un mecanismo de corte alternativo, varias proteínas; por extensión, se trata de un mecanismo regulador de la expresión génica, ya que los diferentes productos del gen pueden tener una actividad característica y alguno ser no funcional.

En varios casos, los intrones separan exones que son dominios estructurales de la proteína. Los dominios estructurales son regiones de la proteína que tienen una participación característica en la actividad global de la misma. La presencia de intrones entre dominios estructurales (exones) podría permitir la mejor combinación de las diferentes regiones de la proteína para obtener una actividad parcialmente modificada. Facilitaría, asimismo, la recombinación de dominios de proteínas distintas en el interior del somito cirujano, mediante la unión de diversos exones del precursor del ARNm, mecanismo que sería una forma de recombinación génica, si bien dentro del precursor del ARNm. Y si el nuevo mensajero revistiera interés para la célula, ésta podría incorporar la nueva información del ARNm al genoma.

¿Qué papel pudo haber desempeñado la aparición de las ribonucleoproteínas de tipo U a lo largo de la evolución? Suponiendo que los intrones de seres superiores surgieran a partir de los intrones autocatalíticos, que todavía detectamos en algunos organismos inferiores, ¿qué ventaja habría adquirido el intrón al perder esa capacidad enzimática? Rasgo típico de los intrones autocatalíticos es una serie de secuencias del precursor de ARN que le confieren una estructura rígida muy característica, responsable de la reacción de autocorte y autoempalme. La reacción es, y fue tal vez, totalmente dependiente del intrón autocatalítico. Pero quizá la evolución reclamó mayor versatilidad a los intrones, para lo que tuvieron que delegar parte de su función en otros factores; entre tales factores se hallarían las ribonucleoproteínas de tipo U que podrían haber adquirido algunas funciones de los intrones autocatalíticos, permitiendo la gran diversidad de intrones que observamos en los organismos superiores.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

STRUCTURE AND FUNCTION OF MAJOR AND MINOR SMALL NUCLEAR RIBONUCLEOPROTEIN PARTICLES. Max L. Birnstiel Ed. Springer-Verlag Berlin, Nueva York 1988.

ALTERNATIVE SPLICING IN THE CONTROL OF GENE EXPRESSION. C. W. J. Smith, J. G. Patton y B. Nadal-Ginard en *Annu. Re. Genet.*, vol. 23, págs. 527-577, 1989.

El caldero de Gundestrup

Un enigmático cuenco hallado en Dinamarca hace cien años se atribuyó, según los casos, a celtas, germanos y tracios. Su estudio reciente pone en tela de juicio tales atribuciones y las teorías sobre las que se sustentaban

Timothy Taylor

El 28 de mayo de 1891, unos cavadores de turba que trabajaban en las cercanías del villorrio de Gundestrup, en la Jutlandia septentrional, descubrieron un curioso objeto metálico. Cuando lo limpiaron, se encontraron con un gran cuenco de plata que contenía unas láminas, cóncavas unas y otras convexas, que en otro tiempo habían estado encajadas, dorso contra otro, para formar las paredes de un majestuoso caldero. Las láminas aparecían decoradas con vívidas escenas bélicas y sacrificiales: divinidades barbudas combatían con feroces bestias, una diosa con el pecho desnudo se mostraba flanqueada por elefantes y una figura central con cuernas de ciervo blandía una serpiente con cabeza de carnero en una de sus manos y un collar o torques en la otra.

Entregaron la pieza al Museo Nacional de Copenhague y el gobierno danés pagó una respetable recompensa a sus descubridores, para quienes fue motivo de amargas disputas. Sin embargo, sus desavenencias quedaron rápidamente ensombrecidas por una controversia académica que continúa en pie desde entonces. ¿Cuándo, cómo, por quién y por encargo de quién fue fabricado este caldero? ¿Cómo fue a parar a la turbera? ¿Qué significan sus escenas? Y, en fin, ¿cómo encaja en nuestra reconstrucción de la sociedad prehistórica?

Voy a intentar contestar a estas cuestiones repasando el progreso de la interpretación científica del propio caldero. Este siglo de polémica ha reflejado tanto la llegada de nuevos acercamientos técnicos como variaciones en la forma en que los arqueólogos reconstruyen la prehistoria. En muchos aspectos, el caldero de Gundestrup constituye una piedra de toque de la metodología arqueológica.

Las soluciones de algunos de los problemas planteados por el caldero están hoy al alcance de la mano. Existe un amplio consenso para la datación de este artefacto en la Edad del Hierro más reciente —los siglos segundo y primero antes de Cristo. Una observación reciente con microscopio de barrido electrónico realizada por Erling Benner Larsen, de la Escuela de Conservación de la Real Academia de Bellas Artes de Copenhague, ha revelado que el caldero fue obra de cinco maestros plateros. Mi propio análisis de las representaciones pictóricas muestra que, aunque el objeto presenta rasgos que se suponen célticos y fue hallado en una región de Europa considerada a la sazón germánica, los plateros vivieron probablemente en Tracia, en la Europa sudoriental.

Otras cuestiones más profundas van pasando también a primer plano. El análisis del caldero de Gundestrup pone en tela de juicio la doctrina recibida sobre la vida en la Europa de la Edad del Hierro; el intento de comprender el artefacto en su contexto ayuda, pues, a refinar las teorías que los arqueólogos utilizan para reconstruir la sociedad prehistórica. Etnicidad, género y mitología pueden haber sido todos ellos más complejos de lo que se había admitido con anterioridad. Quizá no hubiera fronteras cultu-





1. TESORO DE PLATA procedente de una turbera danesa; así aparece en una de las varias disposiciones plausibles del cuenco y de las láminas que lo coronan (*derecha*). Las láminas fueron encontradas desmontadas (*primera a la izquierda*), lo que dificultó la reconstrucción de su narración pictórica. El cuenco fue martillado a partir de un solo lingote, una proeza de gran exigencia técnica. Las reparaciones posteriores muestran menor destreza: la fotografía desde arriba (*segunda a la izquierda*) pone de manifiesto cómo se taponó un agujero de la base soldando encima una falera o adorno de brida, en plata.

TIMOTHY TAYLOR es encargado de curso en el departamento de ciencias arqueológicas de la Universidad de Bradford y editor adjunto de la revista *Antiquity*. Estudió arqueología y antropología en la Universidad de Cambridge, graduándose en 1982; posteriormente llevó a cabo investigaciones en Bulgaria y en Oxford. En 1988 volvió a Cambridge como investigador de primer grado en el King's College, trasladándose a Bradford en 1990.

rales cerradas; la humanidad y sus dioses podrían haberse imaginado con algo más que los meros géneros masculino y femenino, y las creencias religiosas pudieran haber sido flexibles y variopintas.

El análisis paleobotánico llevado a cabo en el momento del hallazgo del caldero determinó que éste había sido depositado sobre suelo seco. Unas condiciones de mayor humedad, que comienzan con nuestra Era, habrían provocado el crecimiento de turba en torno de la vasija, cubriéndola con un manto de casi un metro de grosor. De este modo, lejos de constituir una ofrenda votiva en la turbera (como muchos creyeron), el cuenco parece haber estado oculto en el yerbazal, fuera del circuito inmediato del asentamiento más próximo. Es evidente que alguien pretendió volver por él.

Aunque el caldero no apareció asociado con objetos de datación más fácil, como son los tejuelos cerámicos, sí que lleva representaciones de yelmos, espuelas y otros objetos que no estuvieron en uso mucho antes del 150 a.C. En el momento de su abandono, el caldero ya era, no obstante, viejo, estaba dañado y le faltaba una de sus ocho láminas externas. Además, tal como lo ha puesto de manifiesto Larsen, la lámina circular de la base era originalmente un adorno de brida de caballo; sólo después fue soldado a la base del cuenco para reparar un agujero. El caldero se escondió probablemente en un momento dado del siglo primero a.C., de 50 a 150 años después de su fabricación. Fue reparado y posiblemente desmontado y vuelto a montar más de una vez en dicho intervalo.

La artesanía original sobrepasaba en calidad con mucho a la labor de reparación. El cuenco, de 70 centímetros de diámetro, fue batido a partir de un solo lingote, tarea ésta bien complicada. Se trabajaron las láminas con la técnica del repujado: primero se perfilaron los contornos de la placa por medio de frecuentes horneados y, luego, con buriles y otras herramientas se decoraron las superficies alzadas, apoyadas por detrás.

Larsen ha utilizado las marcas de herramientas para identificar a los artesanos. Hizo vaciados elásticos de silicona de la superficie del caldero, dorándolos y obteniendo imágenes del oro con microscopio electrónico de barrido. Las imágenes ofrecieron "firmas" representativas de cinco juegos de herramientas, que Larsen adscribió convincentemente a cinco artistas diferentes. Su análisis corrobora las interpretaciones estilísticas.

Saber el número de los plateros resulta más fácil que situarlos. De aquella sociedad iletrada sólo conocemos las descripciones parciales de autores clásicos y cuanto nos revelan las problemáticas reconstrucciones de los arqueólogos. Y digo problemáticas porque dichas reconstrucciones están basadas en una simplificación excesiva de la cultura que tiene su origen en el prehistoriador alemán Gustav Kossinna. En los años veinte, éste definió una cultura arqueológica como la asociación repetitiva de tipos de artefactos hallados exclusivamente en una sola región.

Kossinna vinculaba estos agrupa-





2. LA PLATERIA EUROASIATICA avala una tradición de la Edad del Hierro que trascendió fronteras como las que se asignan a germanos, celtas, tracios, escitas e indios. Estas faleras muestran coincidencias sorprendentes: toros que embisten, por ejemplo, aparecen en la falera de Gundestrup (*arriba, izquierda*) y en otra procedente de la isla de Sark (*abajo, izquierda*).

mientos a un "pueblo" poseedor de un espíritu específico o Volksgeist. Este acercamiento repetía el de los biólogos anteriores a Darwin, que entendían las especies como tipos ideales o esencias. Y precisamente al igual que los esencialistas habían ordenado las especies en una "cadena de los seres", con la humanidad en su culmen, Kossinna jerarquizó a los pueblos. El pueblo germano nórdico o "ario" era considerado el mejor por Kossinna y otros que se identificaban con el mismo —notablemente los nazis, quienes utilizaron dicha creencia para justificar su política de conquista.

La debilidad de la teoría o ideología de Kossinna es palmaria. Al equiparar culturas arqueológicas con pueblos, se implica una coincidencia imposiblemente perfecta de variables antropológicas. La verdad es que es muy raro que coincidan dichas variables. Una nación, aun gobernada por un grupo dominante, comprende varias religiones, lenguas y tipos físicos; además, el arte y la tecnología trascienden a menudo las fronteras nacionales. Con todo, persiste aún la noción de "pueblos puros", si bien en una forma despojada de sus matices racistas más extremos. Muchos arqueólogos siguen siendo integralistas culturales, que identifican tácitamente "culturas" y "grupos culturales" con "tribus" y "pueblos", respectivamente.

Con frecuencia, los integralistas han considerado el caldero de Gundestrup de cultura céltica y procedencia gala. Las fotografías de la vasija aparecen en casi cualquier libro que trate de los celtas. Con todo, debe recordarse que el término "celta" nos viene de los historiadores griegos y romanos, quienes lo utilizaban como denominación general de las gentes que ocupaban gran parte de la Europa central y occidental, ya desde el siglo sexto a.C. en adelante. Del mismo modo, los primeros europeos de América del Norte solían hablar de "pieles rojas" y sólo ocasionalmente señalaban formaciones más específicas; los historiadores antiguos hablaban así en general de "celtas" y rara vez de "tribus".

Los celtólogos más modernos son integralistas: por lo general representan a los celtas como un pueblo unitario de gran antigüedad, distinguido por su lengua, tipo físico, religión, instituciones y cultura material. En esa línea, serían característicos de la cultura céltica parte de la armadura corporal y equipo vestido por las figuras más pequeñas del caldero: ejemplar de collar trenzado o torques, trompetas de guerra carnyx, yelmos con remates de animal y grandes escudos con ombligos circulares.

Estos estudiosos leen igualmente el panteón céltico en las escenas del caldero, identificando, por ejemplo, la gran figura que lleva cuernas de ciervo con el "Cornudo" o Cernunnos. En la figura con rueda se ha querido ver, provisionalmente, al dios céltico de la rueda, Taranis. Aparte de esto hay escaso acuerdo y la rica iconografía del artefacto ha dado pábulo a numerosos vuelos de fantasía mitológica. Ciertos celtólogos han explicado los curiosos elefantes, por ejemplo, en referencia al paso de los Alpes de Aníbal.

La debilidad fundamental de la que se resiente la hipótesis céltica reside en la ausencia en la Galia (la Francia actual) —y en general en Europa nordoccidental— de toda tradición del trabajo repujado en lámina de plata. Para abordar dicho problema, Ferdinand Drexel, de la Universidad de Frankfurt, argumentó en 1915 que el caldero se habría creado en Europa sudoriental, la fuente más cercana de las requeridas destrezas en platería. Este

requisito tecnológico constituyó el pilar básico de la pretensión de Drexel de que el caldero era de origen tracio.

La argumentación de Drexel despertó mi interés por el caldero cuando estaba estudiando el arte tracio (término éste integralista para los agrupamientos culturales de la Europa sudoriental), campo en el que me había iniciado por sugerencia de John Alexander, mi tutor de licenciatura en la Universidad de Cambridge. Al visitar museos de Rumania y Bulgaria, coincidí con Anders Bergquist, un estudiante sueco de posgrado que había quedado fascinado también por el caldero, y comenzamos a trabajar en común. Partimos del trabajo de Drexel apurando la datación y ampliando el abanico de materiales culturales con los que comparamos el caldero, considerando no sólo la técnica, sino también atributos formales e iconográficos. Destacaban, entre éstos, las representaciones de los cordones de los zapatos en el caldero y en otras dos piezas de platería tracia de datación asegurada.

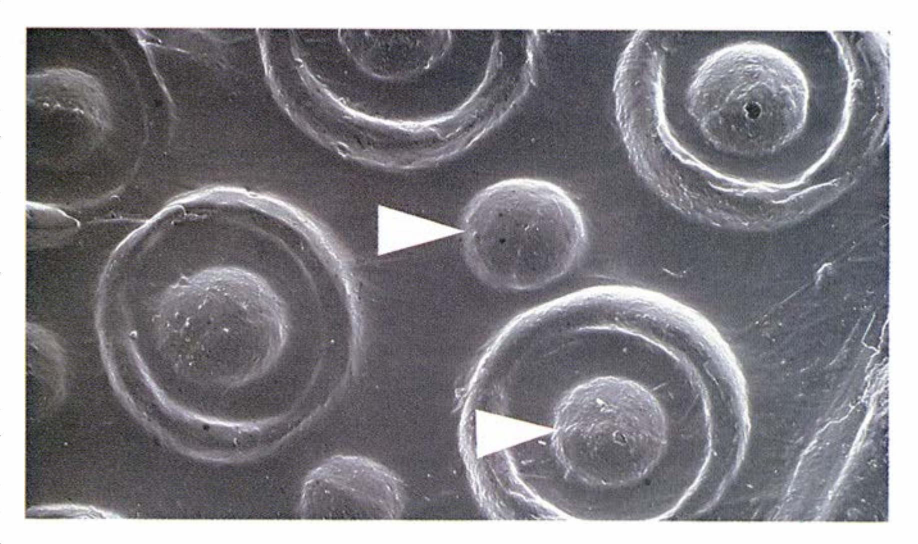
Dichas semejanzas nos llevaron a la conclusión de que el caldero se había fabricado en Transilvania o en la aledaña cuenca inferior del Danubio. Ambas regiones se hallaban en situación de inestabilidad durante la Edad del Hierro reciente. Unas fuentes históricas hablan de "celtas" en algaras por Europa sudoriental poco antes de que se fabricase el caldero, llegando a saquear la Delfos griega en el 279 a.C. e instaurando el reino de Tylis en lo que hoy es Bulgaria. Otras fuentes hablan de incursiones de partidas de guerra germánicas en época posterior a la de la fabricación del caldero. Extrajimos la conclusión de que Europa sudoriental acogía una sociedad multiétnica y que tracios, celtas y germanos habían desempeñado cada cual su papel en la historia del caldero.

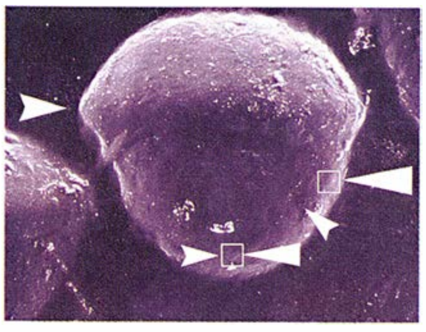
Colegimos que una tribu céltica intrusa, la de los escordiscos, había encargado el caldero a plateros nativos tracios y que unos saqueadores germánicos se lo habían llevado de allí después. Provisionalmente identificamos a estos saqueadores como los cimbrios, los filibusteros que, al decir de los autores clásicos, se fueron al sur desde la región del Elba inferior para atacar a los escordiscos en el 118 a.C. Tras su derrota por los romanos cinco años después, parte de los cimbrios se retiró al norte asentándose en Himmerland (topónimo que suele considerarse ligado etimológicamente a los "cimbrios"), la región de Jutlandia donde se exhumó el caldero. Pero no dependíamos de los cimbrios para nuestra explicación del trasiego del caldero. En ese período, lo documenta la arqueología, existían conexiones culturales entre el Mar Negro y el Báltico.

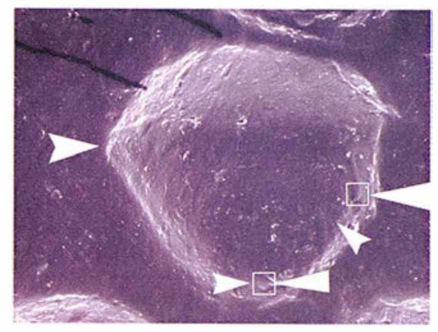
Comenzamos por depurar los razonamientos aducidos sin cuestionar los fundamentos del modelo integralista reinante, si bien permitimos en escena, en un momento dado, más de un pueblo "puro". Tampoco dimos entonces una explicación detallada de los cuadros del caldero, aparte de la referencia de rigor a la figura cornuda como Cernunnos. Los elefantes no plantearon jamás problema alguno a los estudiosos de la Escuela Tracia, dado que estos animales eran empleados en Asia Menor en dicha época y representaciones de los mismos aparecen en monedas.

El progreso siguiente comenzó con un paso en falso. Apuntamos que un análisis de los isótopos de plomo de las láminas de plata del caldero podría identificar la mina de la que se había extraído la mena. Resultó, no obstante, que tal identificación era poco práctica, ya que acuñaciones procedentes de minas diferentes solían ser refundidas rutinariamente para fabricar vasijas de plata. Pero esta posibilidad nos abrió una nueva línea de análisis: si el caldero había sido hecho de monedas fundidas, su peso tendría que ser un múltiplo claro de un peso monetal "normalizado".

Puse esta idea a prueba en Copenhague en mayo de 1991, cuando participaba en la conferencia del centenario del hallazgo del caldero. Realicé pesajes de precisión de cada una de las piezas, compensé lo que faltaba y sometí mis pretendidos pesos originales a Michael Vickers, especialista en metrología del Museo Ashmoleo de la Universidad de Oxford. Reconstruyendo un peso total original de 9445 gramos y un peso de 4255 gramos para el cuenco semiesférico solo, Vickers pudo hallar divisores exactos basados en el *siglos* pérsico, moneda con un peso máxi-







3. ESTAS MARCAS DE PUNZON GEMELAS del caldero se hicieron con una misma herramienta, desde ángulos similares y con fuerza parecida, tal como se muestra ópticamente (*arriba*) y en las microfotografías electrónicas (*abajo*). El microanálisis (*flechas*) de dichas marcas llevó a Erling Benner Larsen, de la Real Academia de Bellas Artes de Copenhague, a atribuir el cuenco a cinco plateros.

¿Se transmitió la cultura desde la India hacia Dinamarca?

De la India a Tracia, se compartía una tradición pictórica y técnica, y, de Tracia (donde se fabricó el caldero), llegaba a Dinamarca (donde se desenterró). Podemos inferir rituales de yoga en las posturas de un hombre con cuernas (*abajo, a la izquierda*) y observando una figura con cabeza de buey sobre una impronta sigilar procedente de la ciudad india de Mohenjo-Daro (*a la derecha*). La procedencia tracia del caldero queda testimoniada en los cordones de los zapatos en zigzag y otros detalles. Percibimos tres vínculos indios más en ese objeto; en la página siguiente y de izquierda a derecha: baños rituales de las diosas con elefantes (la diosa india es Lakshmi), dioses con ruedas (el indio es Vishnú) y diosas con el cabello con cintas y aves emparejadas (la india es Hariti). Reputadas célticas por algunos las divinidades de Gundestrup, éstas también eran panculturales.





mo de 5,67 gramos. (Multiplicando este valor por 1666 y 750 nos da 9445 y 4255, respectivamente).

Este hallazgo se compadece con el origen tracio del caldero. La joyería persa tuvo una influencia formativa importante en el desarrollo de la platería de Tracia en los siglos V y IV a.C., y los pesos persas siguieron en uso tiempo después.

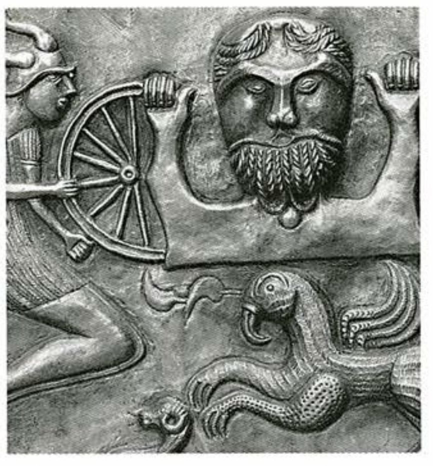
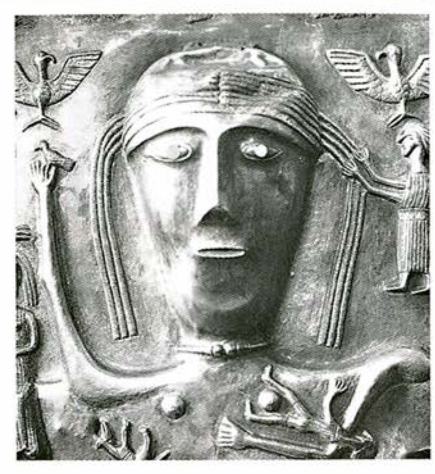
El caldero no era la única pieza de platería sacada de Tracia. El adorno de brida o falera que se empleó para reparar el cuenco es uno más de los muchos que fueron a parar al oeste, en la mayoría de los casos llevados probablemente en los caballos de los mercenarios tracios de servicio en el ejército romano. De especial importancia son las faleras halladas en la isla de Sark, en el Canal de la Mancha, en 1718, perdidas hoy pero conservadas en dibujos detallados. La falera del "toro que embiste" se parece a la lámina de la base de Gundestrup —y también a varias faleras procedentes de la cuenca inferior del Don, controlada a la sazón por el grupo de los sármatas. La falera del "elefante y castillo" es semejante a dos procedentes de un yacimiento del Pakistán septentrional en las inmediaciones de Rawalpindi.

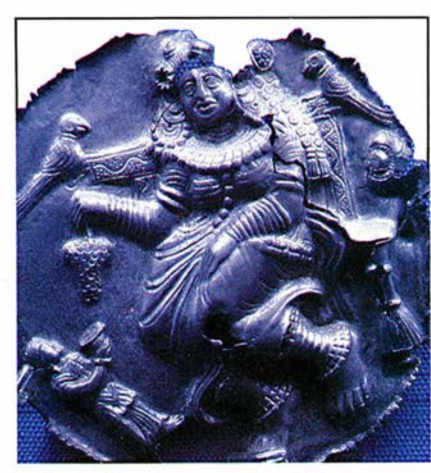
Una tercera falera procedente de Rawalpindi representa a una mujer con su cabello en trenzas y sendas aves posadas en sus hombros. Esta mujer puede ser identificada con Hariti, la protectora de los niños, cuyas claras versiones aparecen en la metalistería sármata de la cuenca del Don. Dicha región ha recibido igualmente un marcado influjo de la India septentrional, conexión ésta percibida en los años treinta por el historiador ruso Mijail Rostovtzeff (posteriormente profesor en la Universidad de Princeton).

Por mi parte ya había señalado una figura con esos mismos atributos —una diosa semejante con aves emparejadas y un niño en el pecho— en una falera procedente de la Bulgaria nordoriental y en el caldero de Gundestrup. Cuando me percaté de la relación con Sarmacia y, en última instancia, con la India, me quedé perplejo. Esta conexión prometía explicar la presencia de elefantes en una de las otras láminas del caldero. ¡Las asociaciones evidentes de una pieza de platería con elefantes habían estado a la vista de cualquiera durante todo un siglo! Siguiendo la conexión de Hariti, vi que la escena de Gundestrup con un par de elefantes que flanquean a una figura femenina representaba a las claras la lustración o baño ritual de Lakshmi, la diosa hindú de la buena fortuna.

A poco de su hallazgo ya se había propuesto la India como lugar de origen del caldero. En 1895 Japetus Steenstrup, de la Universidad de Copenhague, apuntó su alumbramiento en la India septentrional, Tíbet o Mongolia del Medioevo. Pero la intuición de Steenstrup superaba con creces a su capacidad de análisis: presentó una masa de comparaciones vagas y asistemáticas sin explicación alguna. Mirando atrás, se puede ver que quienes arrumbaron sus conclusiones arrojaron al recién nacido con el agua de su baño.

¿Qué podemos hacer para explicar las semejanzas de artefactos procedentes de parajes tan remotos, así

como las variaciones sistemáticas que se dan en ellos? Las semejanzas deben derivarse de las redes de artesanos que traspasaron las lindes étnicas y políticas. Los plateros, por ejemplo, tenían contactos que se extendían a lo largo de 6500 kilómetros, desde la India septentrional hasta los Balcanes. Puede deducirse esta red por los artefactos supérstites, por escasos que sean.

Las variaciones en la iconografía reflejan las inexactitudes que se van acumulando según los artesanos copiaban el trabajo de un maestro o de un rival, como en un juego de chismorreo en que el mensaje va cambiando cada vez que se emite. Tenemos un buen ejemplo en los extraños hombros puntiagudos de los elefantes de Gundestrup, que claramente no están copiados del propio animal, sino de la copia de una copia de uno. Algo aún más expresivo: las orejas de los elefantes de Gundestrup descansan extrañamente en lo alto de sus frentes, evidentemente porque derivan, *mutatis mutandis*, de los sombreros decorativos representados en los modelos indios. Sin embargo, la estructura de esta escena tan estereotipada permanece intacta.

La existencia de representaciones relacionadas por una amplia área y por extensos períodos de tiempo no implica necesariamente que se conservara el significado original. Una manifestación más primitiva de la protectora de los niños era Hariti, la ogro que los devoraba. El significado de la figura que hemos identificado como un tipo de Hariti en el caldero puede haber experimentado igualmente varias trasformaciones.

Nerys Patterson, de la Escuela de Lenguas y Literaturas Célticas de la Universidad de Harvard, me ha señalado la similitud sorprendente entre Hariti y Rhiannon —una figura de las historias de Mabinogion, escritas en galés (lengua céltica) en el siglo XII d.C. Rhiannon experimenta también la mutación de depredadora a protectora y aparece acompañada de otro par de aves. No queda claro si esta semejanza es el resultado de una coincidencia, una pervivencia del tipo primigenio de Hariti transmitido 1000 años antes en el caldero y platería conexa o una transmisión posterior e independiente.

Implícita en este modelo de transmisión cultural a través de redes transnacionales va la noción de artesanos pertenecientes a una clase itinerante, una de las tantas, quizá, del mundo antiguo. Podemos adivinar algunos aspectos de sus relaciones sociales con sus clientes por las escenas del caldero y de otros artefactos. La figura barbilampiña a un lado de la rueda, frente al caudillo barbado, puede ser, por ejemplo, un especialista en ritos. Por supuesto que puede pertenecer al mismo grupo, gremio o casta que los cinco plateros, ya que la metalurgia era en sí misma un importante oficio ritual.

Una analogía provechosa nos la proporcionan los modernos hablantes de romaní, los zíngaros; se han solido dedicar a servicios considerados ritualmente peligrosos por las sociedades sedentarias entre las que se mueven. Estos servicios incluyen la música de los entierros, la buenaventura y la calderería. Al igual que los zíngaros han pasado sin dejar apenas registro en la historia escrita, estos



grupos nuestros identificados por la arqueología fácilmente pueden haber escapado a la atención de los autores clásicos. Aun cuando vivieron en la Europa sudoriental, los plateros de Gundestrup a lo mejor ni siquiera se consideraron tracios ni de cualquier otro lugar que pudiéramos atribuirles.

Podrían haberse parecido a los enareos de Escitia, la actual Rusia meridional, de los que nos hablan Heródoto e Hipócrates en el siglo quinto a.C. Vestidos de mujer aun siendo varones, los enareos interpretaban presagios y solventaban disputas para la aristocracia escita. Especialistas del estilo aparecen atestiguados por toda Eurasia en la Edad del Hierro, no tanto como los chamanes de Escitia y los yoguis de la India, sino como los videntes de Tracia, los druidas de Galia y, pocos siglos más tarde, los bardos de Irlanda. En Irlanda, el bardo varón que alababa al rey con su canto recibía el tratamiento de hembra ante la virilidad del monarca. Etnicamente, tanto bardos como plateros quedaban fuera de la población sedentaria, disfrutando una condición similar a la de una casta india.

La imagen más famosa del caldero, el Cernunnos de cuernas de ciervo, encaja en este panorama de forma bastante notable. En 1959 Heinz Mode, de la Universidad Martín Lutero de Halle, señaló la sorprendente semejanza entre la figura del caldero y la de un sello de piedra procedente del yacimiento de Mohenjo-Daro, en el valle del Indo, del segundo milenio a.C. Ambas figuras están sentadas en posturas que parecen de yoga, pero Mode, al creer en el origen celta del caldero, argumentó que estas posturas de fecha tan temprana no podían ser de yoga, sino interculturales.

Thomas McEvilley, de la Universidad de Rice, acaba de señalar, no obstante, que, si bien la figura de Mohenjo-Daro tiene genitales masculinos, aparece vestida con la moda femenina del momento. También señala que su postura de yoga se parece a la practicada todavía en la India rural por los yoguis-brujos de casta inferior que se buscan la vida vendiendo encantamientos, haciendo tatuajes, domeñando serpientes e interpretando presagios. Además, se pretende con esta postura comunicar una energía sexual. Las observaciones de McEvilley arrojan una luz muy diferente sobre la semejanza entre las figuras de Mohenjo-Daro y Gundestrup.

Dentro de la gramática figurativa del caldero, con la que los varones se representan con barba y sin pechos y las hembras sin ella y con éstos, la figura cornuda es de un género ambiguo. Además, tiene uno de sus talones apretado contra la ingle —en una postura vinculada con la del ejemplo de Mohenjo-Daro y adoptada probablemente con la misma idea de transmitir energía. La figura aparece en levitación parcial, columpiándose sobre un pulgar, y tiene una torques redonda, una serpiente con cabeza de carnero y cuernas. Estos atributos cobran sentido en el contexto de una cobertura chamánica de potencia sobre tres parcelas normalmente separadas: lo femenino, lo masculino y lo animal.

Los artistas de Gundestrup distaban muchísimo, en espacio y tiempo, de los de Mohenjo-Daro y trabajaban en medios diferentes y con técnica distinta. A pesar de lo cual produjeron imágenes similares porque trabajaban bajo condicionamientos rituales parecidos. Ambos grupos eran castas que se movían fuera de las sociedades sedentarias y los dos ofrecían una gama de servicios rituales a quienes se los requerían. Dichos rituales se basaban evidentemente en una tradición mágica común en Eurasia y que sobrevive hoy en el yoga tántrico y en el chamanismo siberiano.

Así pues, este tipo de castas parece haber desempeñado un papel crucial en la imbricación de la cultura del mundo antiguo. Dicha perspectiva puede resultar más importante, en fin, que la recuperación del significado original de la narrativa figurativa del caldero. Como ocurre con ciertos problemas matemáticos, el planteamiento pudiera revestir mayor interés que la solución.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

AN ARCHAEOLOGY OF YOGA. Thomas McEvilley en *Res*, vol. 1, págs. 44-77; primavera de 1981.

SEM-IDENTIFICATION AND DOCUMENTATION OF TOOL MARKS AND SURFACE TEXTURES ON THE GUNDESTRUP CAULDRON. Erling Benner Larsen en *Recent Advances in the Conservation and Analysis of Artifacts*, compilados por James Black. Universidad de Londres, Instituto de Arqueología, Summer Schools Press, 1987.

THE ORIGIN OF THE GUNDESTRUP CAULDRON. Anders Bergquist y Timothy Taylor en *Antiquity*, vol. 61, págs. 10-24; marzo 1987.

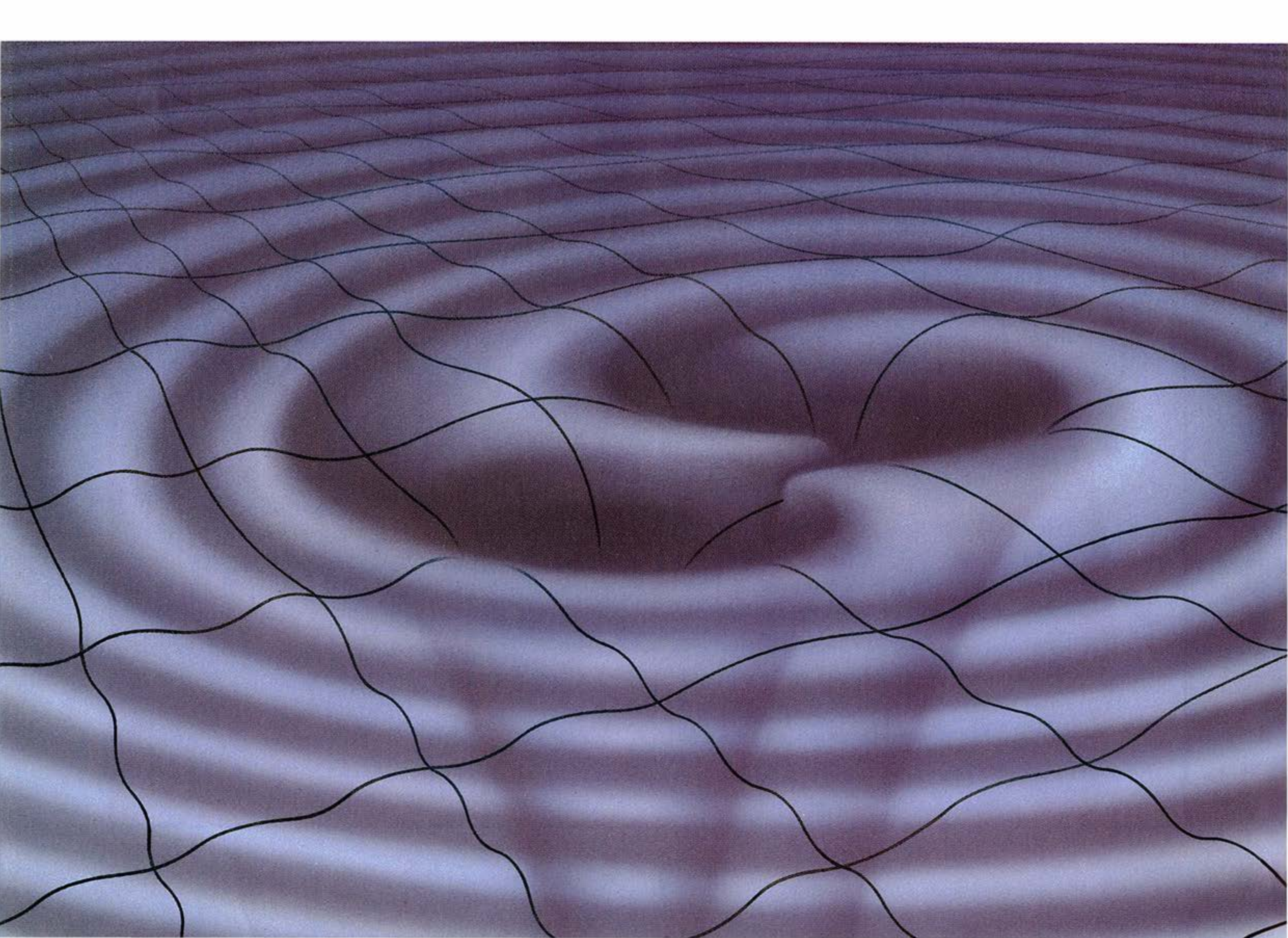
GUNDESTRUPKEDELEN: BAGGRUND OG BILLEDVERDEN. Fleming Kaul. Nyt Nordisk Forlag Arnold Busck, 1991.

ATRAPANDO LA ONDA

Russell Ruthen

El espacio no es sólo la nada entre la Tierra y las estrellas. No es simplemente el vacío que se extiende entre el electrón y el núcleo atómico. Es un medio ubicuo más elástico que la goma, más rígido que el acero. Hace unos 75 años, Albert Einstein se dio cuenta de que el espacio recibe su forma de la masa que contiene. Nuestro Sol no permite comprobarlo por ser demasiado exiguo para deformar el espacio apreciablemente; en cambio, un agujero negro es el deformador óptimo: un agujero negro pequeño contiene tres veces más masa que nuestro Sol en una esfera de volumen mil billones de veces menor. Si dos agujeros negros chocasen entre sí, curvarían, entrelazarían y retorcerían el espacio de una manera que apenas empezamos a vislumbrar. Estas colisiones cataclísmicas proporcionarían la prueba definitiva de la construcción intelectual de Einstein más avanzada, su teoría de la relatividad general.

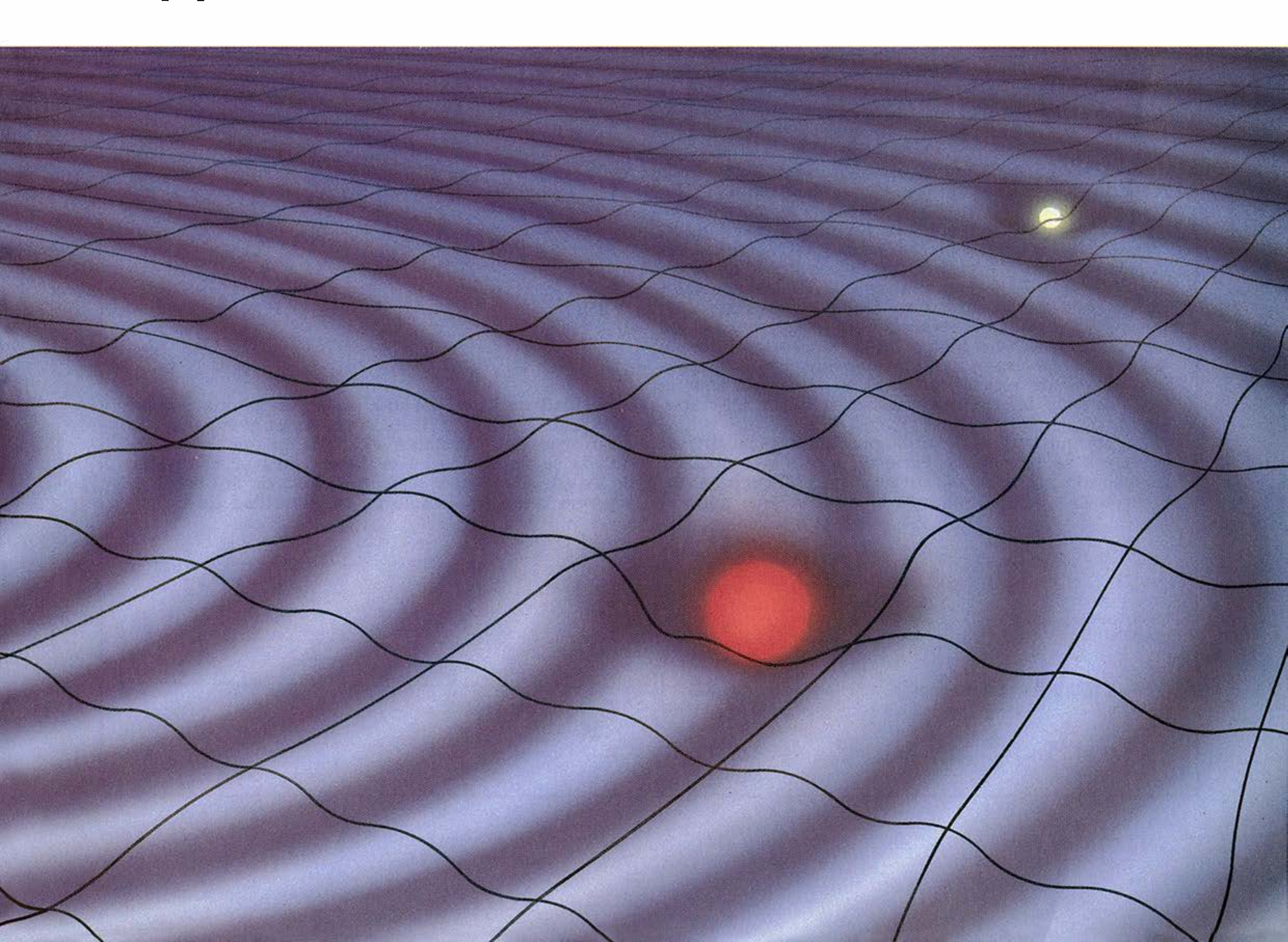
Tras decenios de investigación —y numerosos intentos parciales— la física está preparada para construir una rara especie de telescopio que permitirá, finalmente, observar tales acontecimientos de deformación del espacio. A diferencia de todos



La ciencia sueña con la detección de ondas gravitatorias como una clave para explorar la naturaleza de la gravedad y los confines del universo. Los gobiernos de Estados Unidos, Europa y Japón prometen su apoyo

los demás, este instrumento no será sensible a la radiación electromagnética (ondas luminosas, radioeléctricas, rayos gamma o de cualquier otra parte del espectro), sino que estará diseñado para detectar ondas gravitatorias, es decir, pequeños cambios en la forma del espacio.

Los astrónomos han visto los efectos de las ondas gravitatorias, pero hasta la fecha no se ha construido ningún instrumento con sensibilidad suficiente para detectarlas directamente. De acuerdo con Einstein, las ondas gravitatorias se propagan desde sus fuentes hacia el exterior en pequeñas ondulaciones recorriendo un estanque. Al expandirse por el espacio, las ondas se debilitan, pero, a diferencia de la radiación electromagnética, las ondas gravitatorias no las detienen estrellas ni residuos cósmicos ni —cuando por último la alcancen— la Tierra. Con un detector



1. DOS AGUJEROS NEGROS producen ondas gravitatorias cuando orbitan uno alrededor del otro. Aquí el espacio está representado por una lámina dura y elástica: la textura de un trampolín. Cualquier objeto con masa, como las estrellas representadas debajo, ejercerá una tensión sobre el tejido espacial, deformándolo, y un agujero negro estira ese tejido en un grado extremo. Al moverse los agujeros negros uno alrededor del otro, parte de las distorsiones viajan hacia el exterior del sistema en ondas gravitatorias.

muy sensible sería posible, por tanto, observar ondas gravitatorias, ya que comprimen y expanden el espacio y la materia en una cantidad infinitesimal. Por ejemplo, si las ondas gravitatorias procedentes de dos agujeros negros que chocan en una galaxia lejana recorrieran un detector de un kilómetro de largo sobre la Tierra, la longitud del mismo cambiaría en menos de una trillonésima parte de un metro; aproximadamente 1000 veces menos que el diámetro de un núcleo atómico.

De aquí a cinco años

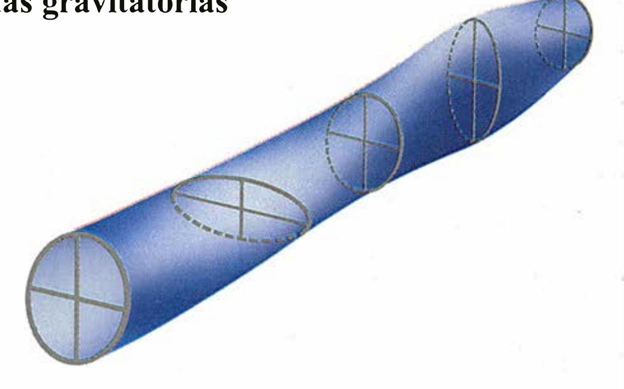
Un equipo de físicos del Instituto de Tecnología de California (Caltech) y del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT), encabezados por Rochus E. Vogt, espera atrapar la primera onda —y otras muchas más. Durante los próximos cinco años, el grupo planea levantar dos instalaciones en lados opuestos de los Estados Unidos en las que se alojarán los mayores interferómetros del mundo. Cada dispositivo generará intensos haces de láser que rebotarán una y otra vez a lo largo de dos trayectorias de cuatro kilómetros de longitud y que se interferirán entre sí en un punto. Si pasara a través del dispositivo una onda gravitatoria de suficiente intensidad, la distancia que los haces de luz deben recorrer cambiaría ligeramente, alterando el modo en que éstos se interfieren.

El presidente George Bush firmó en octubre de 1991 un proyecto asignando los primeros fondos para la construcción del Observatorio de Ondas Gravitatorias por Interferómetro Láser ("Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory") LIGO, proyecto cuyo coste se cifra en un total de 211 millones de dólares. Si el equipo LIGO alcanza su meta, y las predicciones actuales confían en ello, los interferómetros serían lo bastante sensibles como para detectar las ondas gravitatorias emitidas por un par de estrellas de neutrones en colisión. Si es así, el proyecto puede mostrar la primera confirmación directa de la existencia de ondas gravitatorias hacia el final de la década. Todavía es más importante el que a raíz de entonces los investigadores podrán escudriñar el universo de una manera radicalmente distinta de cualquier observación anterior.

Trabajando con ondas gravitatorias en vez de radiación electromagnética, se podrá detectar tanto los objetos brillantes, del tipo de estrellas en explosión, como los objetos oscuros, cuales son los agujeros negros. Con suerte, podrán descubrir cuerpos celestes desconocidos o incluso ondas gravitatorias emitidas en el instante mismo de la creación.

Muchos no comparten el optimismo del equipo LIGO, y se debate acaloradamente sobre la necesidad del proyecto. Si bien los teóricos pueden calcular la intensidad de las ondas gravitatorias emergentes de dos agujeros negros orbitando, desconocen cuántos sistemas de ese tipo existen. Las estrellas binarias de neutrones son la única fuente de ondas gravitatorias cuyo número e intensidad se puede predecir con fiabilidad. Nadie puede estar seguro, sin embar-

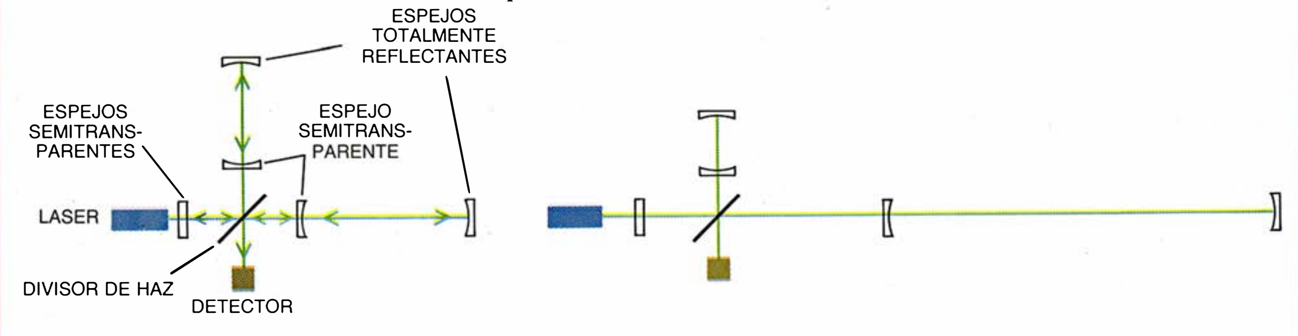
Detección de ondas gravitatorias



Tiene que ser posible observar las ondas gravitatorias porque encogen y estiran el espacio y la materia. Imaginemos, por ejemplo, una onda gravitatoria que recorre un cilindro largo (*derecha*). Al propagarse la onda de un extremo del cilindro al otro, no lo deforma igual en todas direcciones. La onda puede comprimir la materia en una dirección mientras la expande en una dirección perpendicular a la compresión.

El equipo LIGO espera detectar ondas gravitatorias mediante un refinado interferómetro (*abajo*). La luz del láser atraviesa un espejo de reciclaje e incide en el divisor de haz. Después entra en una de las dos cavidades Fabry-Perot, cada una de las cuales consta de un espejo semitransparente y otro reflectante. La luz rebota muchas veces dentro de las cavidades antes de escapar por el espejo semitransparente. Las cavidades y el espejo de reciclaje se añaden para almacenar la luz, elevando la potencia y la sensibilidad del dispositivo.

La luz que escapa de cada cavidad llega al divisor de haz y se recombina. Parte de la luz recombinada es reflejada por el espejo de reciclaje y devuelta al interferómetro. El resto alcanza el detector, que mide la intensidad de la luz. Si una onda gravitatoria potente atraviesa el detector, las compresiones y expansiones del instrumento afectarán al modo en que la luz escapada se recombina en el divisor de haz. El resultado es que el detector registra el paso de la onda gravitatoria como un cambio en la intensidad de la luz.



go, de que LIGO tendrá la sensibilidad suficiente para observarlas.

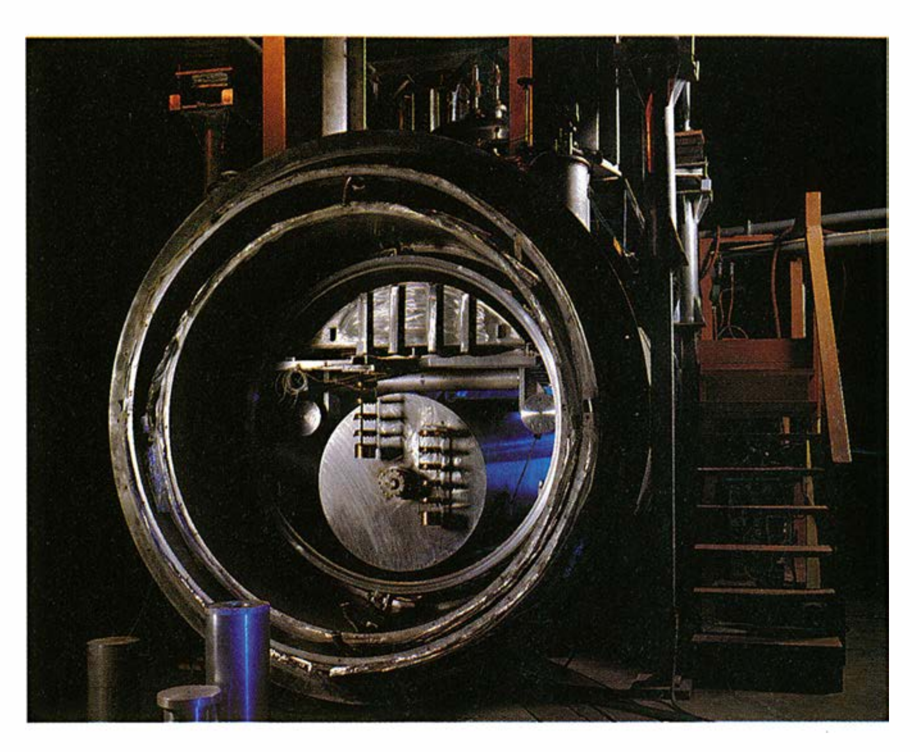
¿Una quiebra en Einstein?

Por otra parte, nadie tenía la certeza de que las ondas gravitatorias existieran hasta tiempos muy recientes. El propio Einstein abrigó sus dudas. En 1916, en su teoría de la relatividad, sostuvo que las ondas gravitatorias, y desde luego la fuerza de la gravedad, son manifestaciones de la curvatura del espacio. Durante varios decenios, los teóricos discutieron apasionadamente si las ondas gravitatorias eran reales o eran un recurso teórico. El debate incitó a Sir Arthur Eddington, cuyas observaciones confirmaban la relatividad general, a comentar que las ondas gravitatorias "se propagan... ¡a la velocidad del pensamiento!"

Durante los años 50, los teóricos llegaron al consenso sobre la existencia real de las ondas gravitatorias. En 1957, Joseph Weber, de la Universidad de Maryland, se puso a construir el primer detector de este tipo de ondas. Su componente principal era una barra cilíndrica de varias toneladas de peso, suspendida por cables en el interior de una cámara de vacío, y aislada en el máximo grado posible de vibraciones exteriores. Tras examinar todas las fuentes de radiación gravitatoria conocidas en la época, Weber determinó que la mayoría de ellas emitirían ondas de frecuencias cercanas a 1000 ciclos por segundo. Por tanto, preparó el tamaño, forma y composición de la barra de modo que resonara como un diapasón para ondas de esa frecuencia.

Si el paso de una onda gravitatoria originase la expansión de la barra, y su posterior contracción, un transductor podría convertir los minúsculos movimientos en señales eléctricas susceptibles de medición. La intensidad de la onda estaría relacionada con la deformación (la variación de longitud dividida por la longitud) inducida en la barra. Después de construir varios prototipos, Weber eligió un detector formado por una barra de dos metros de largo, que era capaz de medir deformaciones de una parte en 10^{16}, o sea, una variación de longitud en torno a las dos décimas de milésima de billonésima de un metro.

Durante los últimos 35 años, Weber ha notificado varios sucesos que él reivindica como "pruebas de ondas gravitatorias". Sus más famosos resultados, en 1969, parecían demostrar la radiación de ondas gravitatorias desde el centro de nuestra galaxia. Tras los informes de Weber, muchos laboratorios por todo el mundo han construido refinados detectores de barra para confirmar sus resultados, pero ninguno ha aportado datos estadísticamente significativos de la presencia de ondas gravitatorias.



2. DETECTOR DE BARRA, construido para percibir ondas gravitatorias. Si una onda fuerte atravesara el detector, produciría una deformación en la barra (cilindro de aluminio suspendido en una cámara de vacío). Las deformaciones y las vibraciones resultantes podrían entonces detectarse. El aparato, instalado en Universidad de Stanford, enfría la barra hasta cuatro grados kelvin para reducir vibraciones extrañas causadas por el calor.

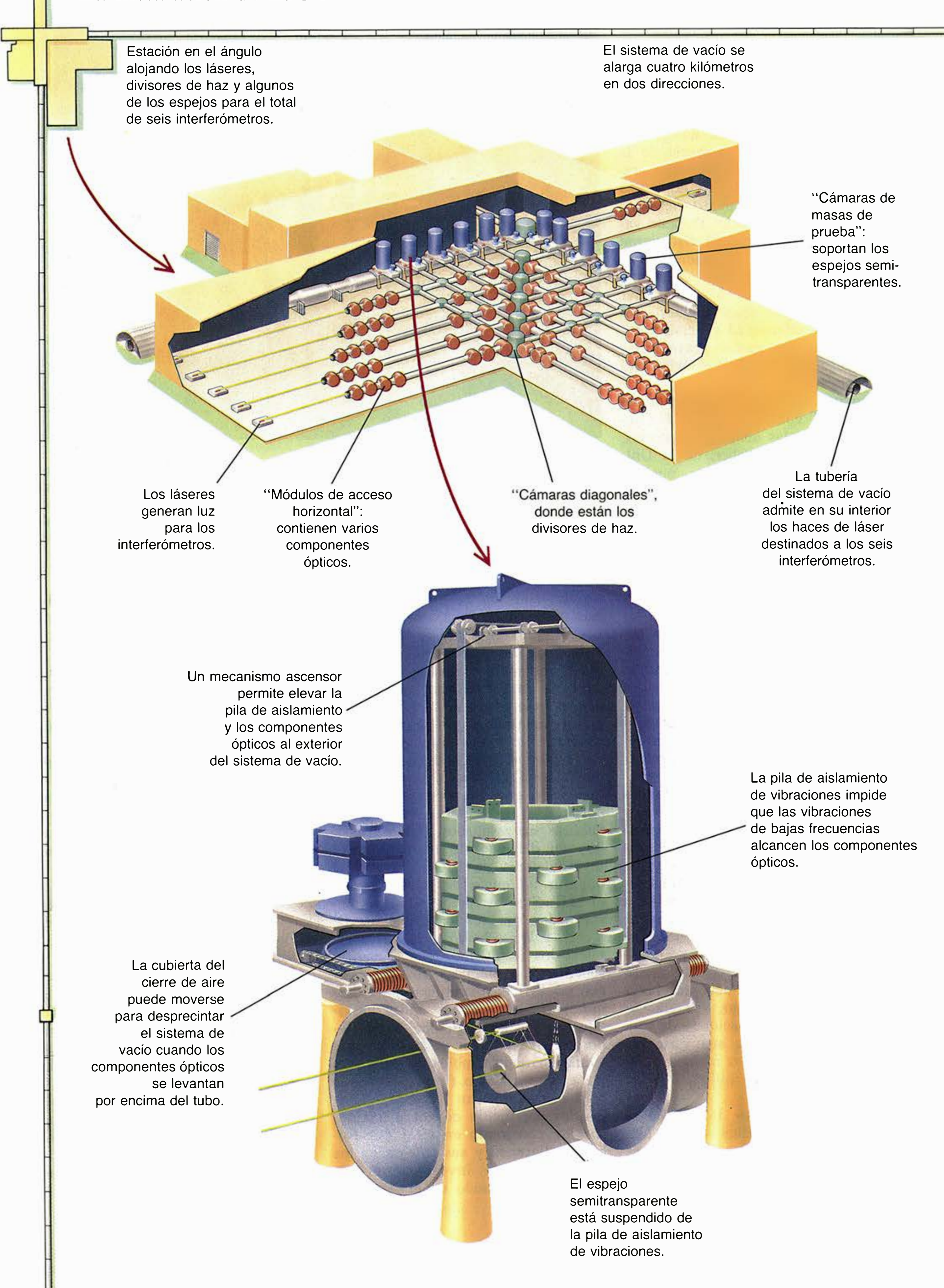
No obstante, el trabajo precursor de Weber inspiró a otros en la búsqueda de ondas gravitatorias. Poco después de que Weber empezara a publicar sus resultados, Rainer Weiss, hoy en día uno de los principales investigadores de LIGO, empezó a impartir un curso de relatividad en el MIT. Sus discípulos estaban entusiasmados por los experimentos de Weber, y Weiss buscó el modo de explicar los resultados de una manera sencilla. Fue entonces cuando se le ocurrió la idea de utilizar haces luminosos para detectar ondas gravitatorias. (En aquel tiempo, Weiss ignoraba que Weber y algunos más habían pensado también en utilizar la luz con ese mismo fin.)

El primer detector de ondas gravitatorias por medio de haces luminosos fue construido en 1971 por Robert L. Forward y sus colegas en los Laboratorios de Investigación Hughes. Estaba basado en el interferómetro, inventado 90 años antes por el físico norteamericano Albert A. Michelson para refutar la existencia del éter cósmico.

La forma moderna del dispositivo de Michelson consiste en un láser, un divisor de haz, dos espejos y un fotodetector dispuestos en cruz. El láser se coloca, por ejemplo, en el extremo oeste de la cruz; el detector descansa en el extremo sur; los espejos se sitúan en los extremos este y norte; y el divisor de haz se fija en el medio. El haz del láser atraviesa el divisor, que dirige la mitad de la luz hacia el espejo norte y la otra mitad al espejo este. Ambos espejos reflejan la luz y la devuelven por su trayectoria anterior hacia el divisor, donde el haz es recombinado y dirigido al detector.

Lo que el detector mide depende de las distancias entre el divisor de haz y los espejos. Para ciertos valores de las distancias, cuando las ondas luminosas emergen del divisor hacia el detector, las crestas de las ondas que vienen desde el norte están en sincronía con las de las ondas que proceden del este. En virtud de ello, las ondas luminosas se refuerzan mutuamente, aumentando la intensidad del haz recombinado que incide sobre el detector. Pero si la

La instalación de LIGO



Una estación intermedia contiene espejos totalmente reflectantes para tres interferómetros de dos kilómetros.

La estación terminal contiene espejos totalmente reflectantes para tres interferómetros de cuatro kilómetros.

distancia entre el divisor de haz y uno de los espejos se varía en media longitud de onda del haz luminoso, las crestas de la onda proveniente del norte emergen del divisor a la vez que los valles de la onda luminosa procedente del este, con lo que las dos se anulan entre sí, y no llega ninguna luz al detector.

Para detectar ondas gravitatorias, los espejos se colocan de manera que las ondas luminosas se anulen. Si una onda gravitatoria atravesara el interferómetro, haría variar ligeramente las distancias entre los componentes. Como resultado, algo de luz incidiría en el detector, el cual registraría un cambio en la intensidad, proporcional a la intensidad de la onda gravitatoria.

La mayoría pensó que los interferómetros serían más sensibles a las ondas gravitatorias que los detectores de barra, pues el interferómetro reacciona a la velocidad de la luz, mientras que los componentes de un detector de barra responden a una velocidad igual a la del sonido.

Un detector astronómico

Aunque la sensibilidad de aquellos interferómetros centuplicaba la de las barras de Weber, ninguno ha conseguido todavía captar indicios de onda gravitatoria. Por ironía de las cosas, la única observación convincente de la existencia de las ondas gravitatorias no proviene de detectores de ondas gravitatorias, sino de radiotelescopios. En 1974, los astrónomos Joseph H. Taylor Jr. y Russell A. Hulse, por aquel entonces en la Universidad de Massachusetts en Amherst, descubrieron PSR 1913+16, una estrella "de neutrones" que ha aportado pruebas sólidas, cuantitativas, de ondas gravitatorias. A semejanza de otras estrellas de neutrones, PSR 1913+16 tiene una masa algo mayor que la solar, comprimida en una esfera de menos de 10 kilómetros de diámetro. A tal densidad, la forma que la materia adopta con mayor comodidad es la de neutrones, y de ahí su nombre.

La PSR 1913+16 pertenece a un tipo de estrella de neutrones llamado púlsar, caracterizado por un campo magnético muy intenso que gira con la estrella. Dicho campo acelera las partículas cargadas situadas en las proximidades, generando haces de radiación que emergen de cada uno de sus polos magnéticos y están sometidos al movimiento de rotación de la estrella, brillando en el espacio como un faro giratorio. Observándolos, Taylor y Hulse descubrieron que la PSR 1913+16 gira al ritmo de 16,9 vueltas por segundo, con una regularidad comparable con la de un reloj atómico.

Pero todavía presenta la PSR 1913+16 una peculiaridad mayor: describe una órbita completa alrededor de una estrella compañera cada 8 horas. Alcanza una velocidad máxima de 400.000 metros por segundo, sólo 750 veces por debajo de la velocidad de la luz. Además, la distancia entre el púlsar y su compañera es 100 veces menor que la distancia de la Tierra al Sol.

En esencia, el púlsar es un reloj de precisión que orbita rápidamente a través de una región del espacio muy deformada, distorsión causada por la masa de la compañera. Estas condiciones son ideales para observar efectos relativistas. Taylor explica que, de acuerdo con la teoría de la relatividad de Einstein, el período orbital debería "decrecer gradualmente como resultado de la pérdida de energía del sistema en forma de ondas gravitatorias".

Desde 1974, Taylor y sus colegas han estado observando la disminución del período orbital. Sus medidas concuerdan con las predicciones con una incertidumbre menor del 0,5 por ciento. "De una manera extraordinaria, ahora tenemos datos que confirman este ligerísimo efecto que Einstein temió que nunca pudiera ser observado."

Por desgracia, las ondas gravitatorias emitidas por la PSR 1913+16, debilísimas, no pueden ser detectadas por las barras de Weber, los interferómetros existentes y ni siquiera el LIGO propuesto. Sin embargo, el descubrimiento de PSR 1913+16 animó a los físicos a seguir imaginando cuáles serían los objetos del universo capaces de producir suficiente radiación gravitatoria, que detectaran los instrumentos colocados en tierra.

Uno de los teóricos que lideran este grupo —y uno de los asesores principales del equipo LIGO— es Kip S. Thorne. En los años setenta y ochenta, él y algunos más demostraron que el universo debería contener muchos tipos distintos de fuentes de ondas gravitatorias, aunque fracasaron en el intento de hacer predicciones cuantitativas. En todos los casos, les faltaba al menos una pieza importante de información que hacía imposible predecir la intensidad de la fuente o bien el número de fuentes existentes.

Diez años atrás, creíase que la fuente plausible de ondas gravitatorias detectables sobre la Tierra sería una supernova, la explosión de una estrella masiva. Estimaron que al año se producen millones de supernovas a través de todo el universo, cifras tan rotundas que les aseguraban que muchas estrellas explosionarían en galaxias relativamente cercanas.

Sin embargo, por sí solo ello no garantiza la detectabilidad. Las críticas señalaban que los astrofísicos desconocían la dinámica de las supernovas, y anotaban que la intensidad de las ondas gravitatorias producidas por una supernova dependía de que el colapso de la estrella fuera no asimétrico. De acuerdo con la teoría, una fuente potente de ondas gravitatorias requiere un objeto masivo, compacto, que debe ser no esférico, como un balón de rugby, un cilindro o unas pesas. Lo más importante es que la fuente se mueva rápidamente de tal manera que acentúe la componente no esférica. Por ejemplo, una estrella con la forma de un balón de rugby que gire velozmente en torno de su eje mayor no produce ondas gravitatorias, pero si la misma estrella gira alrededor de uno de los ejes perpendiculares a éste, se convierte en un potente emisor.

Atrapados por la onda

Thorne, Bernard Schutz, de la Universidad de Cardiff, y sus colegas ven en las estrellas binarias de neutrones la única clase de fuentes potenciales de ondas gravitatorias cuya intensidad puede predecirse sin ambigüedades a partir de principios fundamentales de la física, y cuyo número puede ser estimado median-

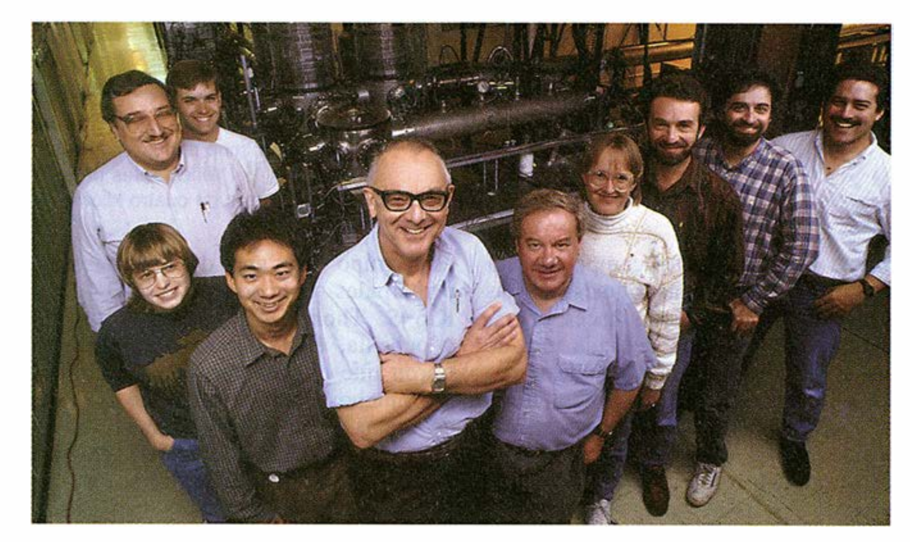
E. Sterl Phinney, del Caltech, estiman, por separado, que es probable que unos pocos pares de estrellas de neutrones choquen cada año dentro de un radio de 650 millones de años luz desde la Tierra.

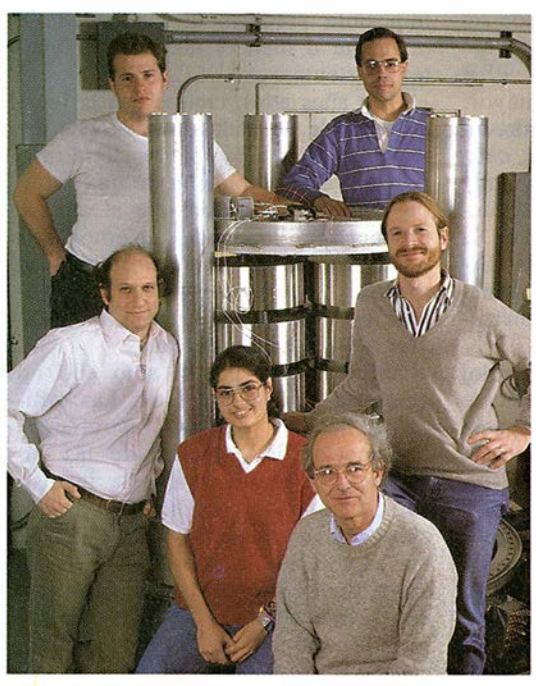
En teoría, pues, si los científicos construyen LIGO de manera que pueda medir deformaciones de cuatro partes en 10^{22}, a lo largo de un año tendrán oportunidad de detectar ondas gravitatorias procedentes de unas pocas estrellas binarias de neutrones. En la práctica, los investigadores necesitarán construir al menos dos detectores en sitios muy alejados entre sí, con el fin de poder distinguir las ondas gravitatorias de las perturbaciones locales. Para determinar la localización de la fuente en el firmamento, tendrían que levantar otro detector en un tercer sitio.

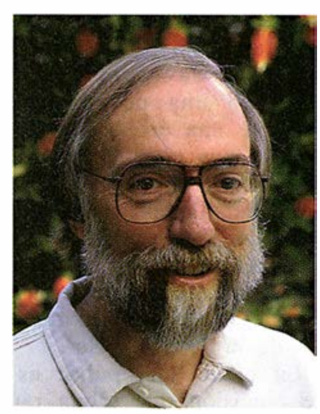
Si LIGO percibe una ráfaga de ondas gravitatorias de una estrella binaria de neutrones antes del fin de la década, Thorne habrá ganado la apuesta (una caja de "buen vino tinto") hecha a Jeremiah P. Ostriker, de la Universidad de Princeton, en 1981. Thorne sostenía que las ondas gravitatorias serían detectadas antes del 2000, y su eminente colega compartía su seguridad en la existencia de las ondas gravitatorias, pero creía que Thorne había sobreestimado la intensidad de sus fuentes astronómicas. Ostriker no ha cambiado de idea. ¿Todavía espera Thorne ganar? "Creo que será coser y cantar", confiesa.

Por supuesto, la historia de LIGO habla de rivalidades, iniciadas cuando Thorne provocó una carrera con el grupo de Weiss, del MIT, para ser el primero en detectar ondas gravitatorias con un interferómetro. En 1979, un año después de que Taylor y Hulse presentasen la primera prueba convincente de las ondas gravitatorias, Thorne logró persuadir a la facultad de física del Caltech para entrar en el campo de la detección de ondas gravitatorias. Para dirigir esta labor, los físicos del Caltech seleccionaron a Ronald W. P. Drever, que había trabajado en detectores de barra e interferómetros en la Universidad de Glasgow.

En respuesta al reciente entusiasmo del Caltech por la detección de ondas gravitatorias con interferómetros, la Fundación Nacional de la Ciencia (NSF) incrementó su aportación, y así comenzó a apoyar las investigaciones en el Caltech y en el MIT con cerca de un millón anual de dólares. Drever y Weiss empezaron a competir en la construcción de







3. *Arriba*: equipo del Caltech, con el director de LIGO, Rochus E. Vogt (con los brazos cruzados en el centro), y el físico Ronald W. P. Drever (a la derecha de Vogt). *Abajo a la izquierda*: el grupo del MIT, con el físico Rainer Weiss (sentado a la derecha). *Abajo a la derecha*: el teórico del Caltech Kip S. Thorne.

te observaciones astronómicas. Una estrella binaria de neutrones se comporta como unas enormes pesas en rotación. Durante cientos de millones de años, las dos estrellas caerán en espiral una hacia la otra, hasta que choquen y se fundan. En los momentos finales antes de la coalescencia, las separará una distancia de apenas 20 kilómetros y se moverán a velocidades comparables a la de la luz.

Las ondas gravitatorias procedentes de una binaria de neutrones en una galaxia a 650 millones de años luz producirían una deformación en la Tierra del orden de cuatro partes en 10^{22}. La frecuencia de las ondas gravitatorias sería igual al doble de la velocidad a la cual las estrellas de neutrones describen espirales aproximándose. Minutos antes de la coalescencia, esos cuerpos girarían a unas cinco rotaciones por segundo, acelerando luego, en su agonía final, hasta más de 500 rotaciones por segundo. Por tanto, la frecuencia de la onda gravitatoria aumentaría de 10 a 1000 ciclos por segundo.

Las estrellas binarias de neutrones escasean en el universo y resulta difícil detectarlas a partir de su radiación electromagnética. Los astrónomos han catalogado más de 400 estrellas de neutrones, pero han confirmado solamente cuatro pares de ellas en nuestra galaxia. A partir de estos cuatro sistemas binarios, los astrofísicos han predicho de modo aproximado cuántas colisiones anuales de estrellas de neutrones se producen en el universo. Ramesh Narayan y sus colegas, del Centro Smithsoniano de Astrofísica de Harvard, y

interferómetros más refinados y sensibles.

La sensibilidad de los dispositivos puede mejorarse elevando la potencia de los láseres y aumentando la distancia entre los espejos y el divisor de haz, pero se ve comprometida por varias fuentes de ruido, originadas por pequeños cambios en la frecuencia del láser o minúsculas vibraciones de los espejos y otros componentes ópticos. Aumentar la potencia del láser y la longitud del haz puede reducir algunos tipos de ruido mientras hace crecer otros.

Para refinar la sensibilidad del interferómetro, Weiss trabajó en dispositivos en los cuales la luz del láser se hace rebotar muchas veces entre dos espejos, a lo largo de diferentes trayectorias. Este sistema de línea de retardo óptico aumenta la longitud efectiva del interferómetro. Mientras tanto, Drever desarrollaba un esquema que utilizaba cavidades Fabry-Perot, en las que la luz del láser rebota entre dos espejos a lo largo de una misma trayectoria, elevando la potencia del interferómetro.

Weiss experimentó con un interferómetro cuyos dos brazos en L medían 1,5 metros —la longitud entre los espejos y el divisor de haz—, y entre tanto Drever construía y manejaba uno de 40 metros.

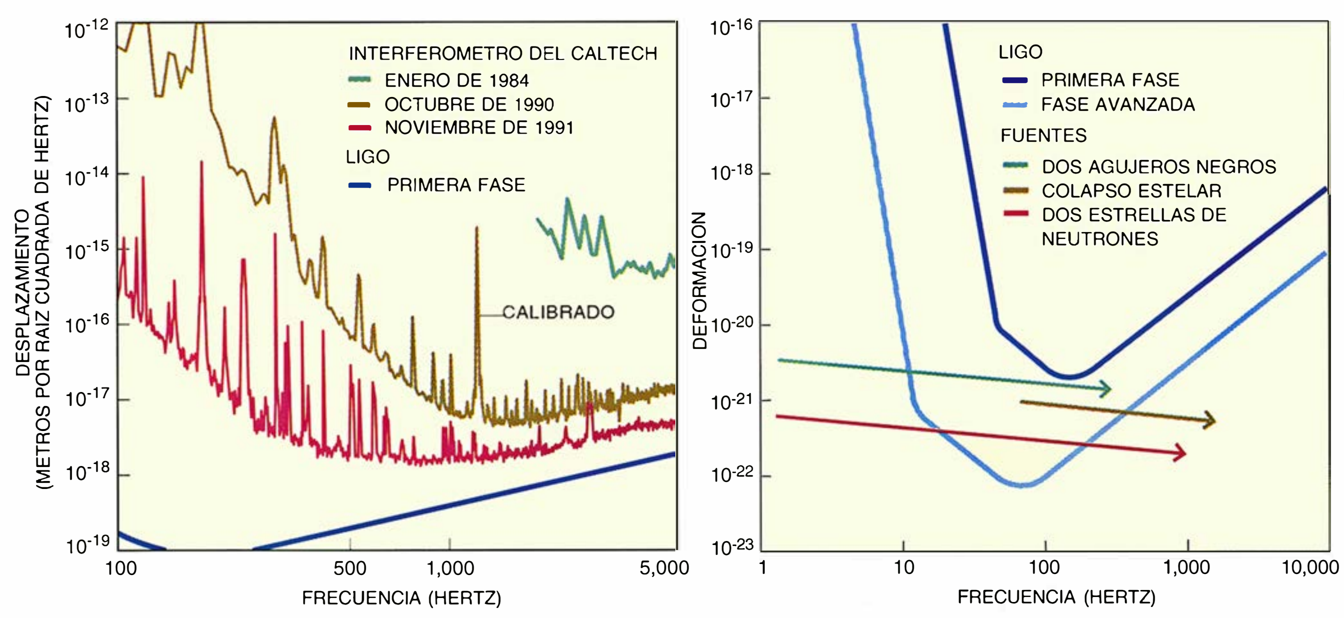
Como el grupo del Caltech parecía tomar la delantera, Weiss decidió en 1981 "hacer algo espectacular". Para llamar la atención de la NSF y atraer fondos hacia el MIT, inició un estudio detallado del diseño y el costo de un interferómetro de escala kilométrica. Pero también despertó el interés de Thorne y Drever, que deseaban mantener el Caltech en cabeza.

La NSF zanjó la cuestión fusionando los grupos del MIT y Caltech en un "maridaje" que marcó el comienzo oficial del proyecto LIGO. Para dirigir la investigación, la NSF constituyó un comité de gobierno formado por Thorne, Drever y Weiss. "Aquello resultó ser un error fatal", según Weiss. Los tres físicos habían esgrimido sus argumentos acerca de cómo debería ser diseñado y gestionado un interferómetro de gran escala.

En 1986, la NSF patrocinó una reunión de trabajo para revisar los planes relativos al proyecto LIGO. Durante la reunión, 55 científicos e ingenieros debatieron los méritos de LIGO delante de un jurado de ocho físicos, expertos en investigación de ondas gravitatorias o en dirección de grandes proyectos científicos. El jurado aprobó los objetivos del proyecto, y pidió que la NSF financiara su construcción.

No obstante, percibiendo problemas en la gestión de LIGO, el grupo asesor recomendó también que la NSF nombrase un director para el proyecto. Un año más tarde, Rochus Vogt aceptó ese cargo. Vogt, distinguido profesor de física y anterior vicepresidente del Caltech, no estaba satisfecho de los progresos alcanzados por los equipos del MIT y del Caltech, e intentó "construir un puente" entre uno y otro grupo haciéndoles pasar por una dolorosa transformación.

Drever, Weiss y sus colaboradores se habían acostumbrado a hacer física experimental a escalas modestas, disfrutando de su independencia y su libertad. Vogt, empero, comprendió que LIGO no era física de sobremesa, sino ciencia de altura, y tuvo que concentrar rigurosamente al equipo en la tarea de desarrollar LIGO. "Como proyecto I+D para construir el mejor posible de los pequeños detectores en L, era magnífico", comenta, "pero como proyecto I+D para preparar la construcción del LIGO de cuatro kilómetros, constituía un desastre."



4. ESPECTRO DE DESPLAZAMIENTOS, que muestra la mejora de la sensibilidad del interferómetro del Instituto de Tecnología de California en años recientes y su comparación con la proyectada sensibilidad de LIGO. La capacidad del interferómetro para detectar ondas gravitatorias depende del espectro de desplazamientos y de la naturaleza de las ondas. Para un impulso corto de radiación gravitatoria de determinada frecuencia, el mínimo cambio detectable es, aproximadamente, el producto del desplazamiento a dicha frecuencia por la raíz cuadrada de la misma. Los picos estrechos no reducen apreciablemente la sensibilidad del dispositivo.

5. ESPECTRO DE DEFORMACIONES, que ilustra la proyectada sensibilidad de LIGO y tres fuentes plausibles de ondas gravitatorias. (Lo proyectado permite eliminar falsos sucesos mediante una razón señal-ruido adecuada.) La línea roja indica la fuerza e intervalo de frecuencias de la onda que podría medirse en la Tierra si dos estrellas de neutrones, a 650 millones de años luz, caen en órbita espiral una sobre otra. La línea marrón muestra las predicciones para una estrella que colapsa asimétricamente a 100 millones de años luz. La verde representa dos agujeros negros coalescentes, 10 veces mayores que el Sol, a 650 millones de años luz.

Ante la era de la astronomía gravitatoria

Gracias a la observación de ondas gravitatorias, descubriremos sucesos misteriosos del universo: explosiones de estrellas masivas, interacciones entre estrellas de neutrones y colisiones de agujeros negros, entre otros. Para registrar información útil de las fuentes de ondas gravitatorias, se necesitarán al menos tres instalaciones de tamaño kilométrico, localizadas en diferentes lugares alrededor del mundo. Los Estados Unidos han asignado 23,5 millones de dólares para LIGO, que consiste en dos instalaciones de cuatro kilómetros de largo.

La aprobación de LIGO ha suscitado esperanzas de que puedan estar próximas las subvenciones para similares proyectos en otros países. Por el momento, los Estados Unidos lideran el campo de la detección de ondas gravitatorias, pero Alemania, Gran Bretaña, Francia e Italia no están muy atrás. Japón ha iniciado un ambicioso programa.

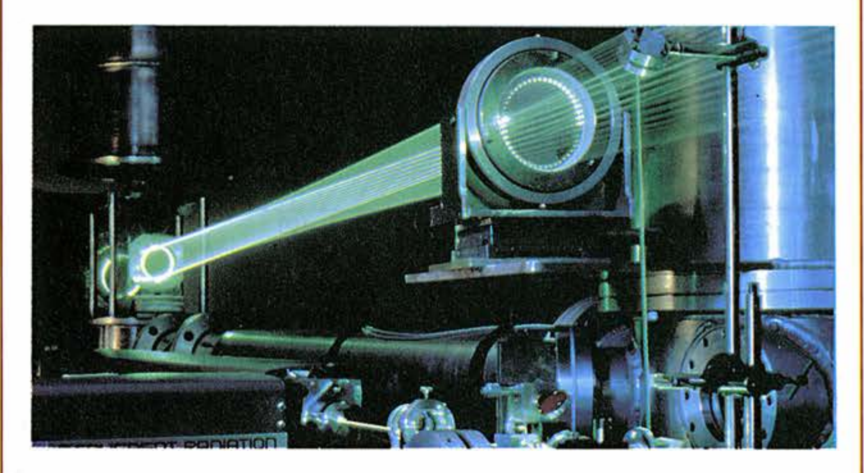
Cada instalación para ondas gravitatorias alojará uno o más interferómetros, instrumentos sensibles a los pequeños movimientos que se producirían cuando los componentes del propio interferómetro interactuasen con una onda gravitatoria intensa. La sensibilidad del instrumento depende de su longitud. Haciendo funcionar tres interferómetros simultáneamente, se podrá determinar la localización en el firmamento de las fuentes de ondas gravitatorias, que será tanto más aproximada cuanto mayor sea el número de instalaciones y la distancia entre ellas.

Alemania y Gran Bretaña han acordado construir en común un interferómetro de tres kilómetros. Aunque el proyecto ha recibido la aprobación en ambos países, el gobierno alemán aún no ha asignado los fondos, y las entidades británicas no están preparadas para hacer inversiones importantes en el proyecto.

Karsten Danzmann, codirector del proyecto de construcción del interferómetro germano-británico, encabeza también un equipo que está reconstruyendo un interferómetro de 30 metros en el Instituto Max Planck de Optica Cuántica en Garching.

El grupo germano-británico espera formar equipo con sus colegas franceses e italianos, que han planeado por su cuenta otro interferómetro de tres kilómetros.

Los investigadores japoneses se han convertido rápidamente en duros competidores en este campo. Recientemente, construyeron un interferómetro de 10 metros en el Instituto del Espacio y Ciencias Astronáuticas. En abril de 1991, Japón empezó un proyecto de cuatro años y 5 millones de dólares para construir un interferómetro de 20 metros en el Observatorio Astronómico Nacional y otro de 100 metros en el Instituto del Espacio.



LUZ DEL LASER rebotando entre los espejos en una demostración del sistema de línea de retardo para el interferómetro de 30 metros en Alemania.

En 1987, Vogt resolvió retrasar los planes de comienzo de construcción de LIGO, y se empeñó en que el equipo hiciera más investigación, hasta que estuviese seguro de poder alcanzar sus objetivos. También decidió concentrarse en el desarrollo del interferómetro Fabry-Perot, deteniendo los trabajos sobre el sistema de líneas de retardo.

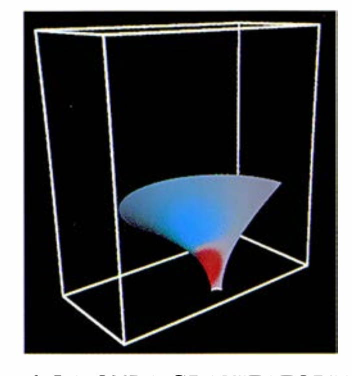
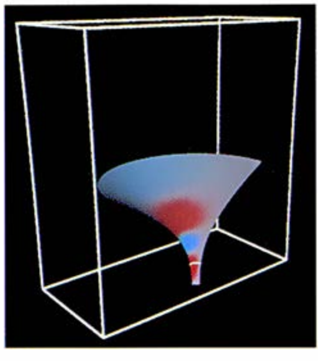
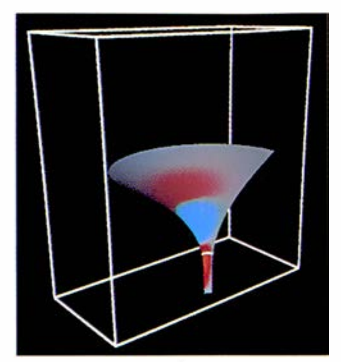
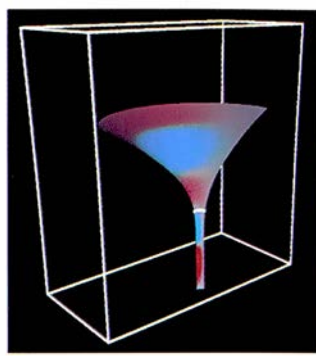
Control del ruido

El equipo de LIGO dedicó los dos años siguientes a analizar prototipos de componentes, incluyendo en ello una completa revisión de todas las fuentes de ruido imaginables. Según el director suplente de LIGO, Stanley E. Whitcomb, el que más perturba a bajas frecuencias es el ruido sísmico, causado por las vibraciones que se transmiten desde el suelo a los componentes ópticos. A frecuencias altas, el problema es el ruido "de descarga" fotónico, resultado de pequeñas fluctuaciones en la potencia del haz del láser. El principal obstáculo a frecuencias intermedias reside en el ruido térmico de suspensión, que aparece por la ligera vibración de toda la estructura proporcional a su temperatura.

Comenzaron por desarrollar modelos que respectivamente describían cada una de las fuentes de ruido, para verificarlos luego, uno a uno, mediante pruebas en el interferómetro de 40 metros del Caltech. Extrapolaron después sus resultados para predecir el efecto que tendría cada ruido sobre la sensibilidad del LIGO de cuatro kilómetros.

A finales de 1989 Vogt y su equipo decidieron que estaban preparados para presentar una propuesta de construcción a la NSF. Según ahora se concibe, LIGO consistirá en dos instalaciones ubicadas en sitios muy distantes. Cada instalación poseerá un sistema de vacío en forma de L, con brazos de cuatro kilómetros de longitud. Las dos instalaciones podrán albergar un total de nueve interferómetros, que funcionarán simultáneamente. Se tiene la idea de instalar gradualmente interferómetros, a lo largo de varios años, empezando por los sistemas más simples y añadiendo luego diseños más avanzados.

Hacia 1997, si todo marcha de acuerdo con el plan, el equipo de LIGO instalará un interferómetro de cuatro kilómetros en cada emplazamiento, y otro interferómetro adicional de dos kilómetros en uno de los dos lugares. Con los tres sistemas de detec-

6. LA ONDA GRAVITATORIA interactúa con un agujero negro en una simulación por supercomputador. El agujero negro curva el espacio, representado por el embudo gris. Las regiones azules y rojas simbolizan ondas gravitatorias. La región bajo la banda blanca indica el interior del agujero negro. En la secuencia de imágenes superior (*de izquierda a derecha*), una onda gravitatoria se aproxima al agujero negro y entra, haciendo que éste genere nuevas ondas. Las imágenes se fundan en simulaciones dirigidas por David Hobill, Larry Smarr y David Bernstein, de la Universidad de Illinois.

ción, el equipo cree que podrá eliminar las falsas señales susceptibles de confundirse con ondas gravitatorias. Se prevé que esta instalación inicial esté capacitada para medir una deformación aproximada de tres partes en 10^{21}, lo que representa una sensibilidad 10 veces menor de lo necesario para detectar las ondas gravitatorias de las estrellas binarias de neutrones.

Tras una búsqueda de ondas gravitatorias a tal sensibilidad, los diseñadores de LIGO proyectan instalar varios sistemas de detección avanzados, que están en fase de desarrollo. Pretenden que estos nuevos sistemas eleven la sensibilidad hasta el mágico número de cuatro partes en 10^{22}, el valor necesario para acertar el blanco cuando se detectan estrellas binarias de neutrones. Para la época en la que ellos hayan instalado estos detectores, esperan que uno de los grupos de Europa, Japón o Australia haya construido un tercer detector kilométrico, el cual les permitirá determinar la localización cósmica de las fuentes de radiación gravitatoria.

El pasado septiembre, el Congreso aprobó la concesión de 23,5 millones de dólares para iniciar la construcción de LIGO. Sin embargo, la oposición al proyecto no ha cesado. Si los planes, a pesar de todo, se mantienen, el equipo LIGO completará los diagramas finales de ingeniería de las dos instalaciones gemelas a lo largo del próximo año, y seleccionará dos lugares muy distantes sobre la parte continental de Estados Unidos, que idealmente serán llanos, amplios y silenciosos, tanto sísmica como acústicamente.

El costo de estas instalaciones —por supuesto, incluido el de los interferómetros— palidece ante el coste del sistema de vacío. Es esencial que todos los componentes de LIGO se mantengan en riguroso vacío para evitar la dispersión del haz del láser por moléculas gaseosas. Cada instalación LIGO exigirá tuberías de acero que encierren un volumen de 9000 metros cúbicos, lo que constituirá el mayor sistema de vacío del mundo. Este sistema, con las estructuras y edificaciones relacionadas, va a consumir más del 90 por ciento del presupuesto de LIGO.

Al final, lo que revele LIGO sobre el universo y la naturaleza de la gravedad será la prueba de su valía. La mera confirmación, de una vez por todas, de la existencia de las ondas gravitatorias sería un logro que podría justificar la empresa. Pero esta comprobación sería sólo el principio de una serie de experimentos que más adelante confirmarán —o desafiarán— las teorías imperantes. Los físicos deberían poder, por ejemplo, determinar propiedades básicas tales como la velocidad de las ondas gravitatorias. Si estas ondas viajan a la misma velocidad que la luz, como predice la teoría, una ráfaga de ondas gravitatorias llegará al mismo tiempo que la ráfaga de radiación electromagnética procedente del mismo suceso.

Más allá de la primera onda

LIGO persigue presas de mayor enjundia que las estrellas binarias de neutrones: como remate de lista, los agujeros negros. Aunque los astrónomos saben muy poco acerca del número de agujeros negros existentes, y no hablemos ya de cuántos de ellos puedan ser binarios, "la mayoría de los expertos esperan que si LIGO puede escudriñar todo el universo, verá coalescencias de agujeros negros binarios a un ritmo de muchas por año", como sugiere Thorne.

Dos agujeros negros, como dos estrellas de neutrones, caerán en espiral uno hacia el otro y producirán una señal gravitatoria que aumentará rápidamente en amplitud y frecuencia a medida que se acercan. Como ha demostrado Schutz, una señal gravitatoria procedente de un sistema binario contiene información sobre la excentricidad e inclinación de la órbita, las masas de los objetos y la distancia absoluta a la fuente. Y la colisión final de dos agujeros negros ofrecerá una extraordinaria oportunidad para probar la teoría de la relatividad. "Por primera vez, podremos ver por la vía de la experiencia el aspecto que tiene un agujero negro", afirma Thorne.

La teoría de Einstein arroja resultados perfectos al predecir cómo reaccionan el espacio y el tiempo ante masas pequeñas que se mueven con lentitud. Pero los teóricos, provistos de las ecuaciones de Einstein, no han acertado a predecir qué le ocurre al espacio cuando dos agujeros negros chocan. La razón estriba en que las ecuaciones de Einstein son no lineales y, por eso, la dinámica de la colisión es muy sensible a parámetros tales como las masas de los agujeros negros, su velocidad de rotación y su órbita.

Se adivinan los días en que los experimentadores registren las ondas gravitatorias procedentes de tal colisión de agujeros negros y los teóricos aprendan a simular estos acontecimientos utilizando supercomputadores. Existe incluso la posibilidad de que los investigadores lleguen en último término a detectar la radiación gravitatoria procedente del nacimiento del universo, lo que se

viene llamando la gran explosión. Los teóricos calculan que la primera radiación gravitatoria se produjo alrededor de una millonésima de quintillonésima de quintillonésima de segundo después de la gran explosión. Creen que las ondas gravitatorias que partieron de ese momento han viajado libremente a través del universo, sin ser absorbidas ni dispersadas por la materia. Las ondas podrían, entonces, revelar cómo era el universo en el principio de los tiempos.

Como término de comparación, la radiación electromagnética empezó a propagarse libremente a través del universo un millón de años después de la gran explosión. La detección de esa radiación abrió importantes perspectivas acerca de la evolución del universo.

Aunque los teóricos sugieren que surgirán ondas gravitatorias de las estrellas de neutrones en caída espiral, las explosiones de estrellas masivas, los choques de agujeros negros e incluso la gran explosión, todas sus predicciones están sometidas a una restricción fundamental: se basan en la información sobre el universo recogida por los astrónomos a partir de señales electromagnéticas. Es casi seguro que algunas predicciones sobre fuentes de ondas gravitatorias sean erróneas. Tratar de imaginar de dónde proceden las ondas gravitatorias estudiando sólo radiación electromagnética es como adivinar el sonido de una orquesta observando a su director.

Los teóricos también admiten que no es lógico pensar que todas las fuentes potentes de radiación gravitatoria emitirán suficiente radiación electromagnética como para hacerse visibles, y por ello es muy probable que el universo contenga fuentes que nadie espera. “Lo único que podemos prometer son estrellas binarias de neutrones coalescentes”, declara Vogt.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

A JOURNEY INTO GRAVITY AND SPACETIME. John Archibald Wheeler. Distribuido por W. H. Freeman and Company. Scientific American Library, 1990.

THE DETECTION OF GRAVITATIONAL WAVES. Dirigido por David G. Blair. Cambridge University Press, 1991.

THE U.S. LASER INTERFEROMETER GRAVITATIONAL-WAVE OBSERVATORY (LIGO) PROJECT. Rochus E. Vogt en *Proceedings of the Sixth Marcel Grossmann Meeting on General Relativity*. Kyoto, Japón. Junio de 1991, LIGO 91-7; septiembre de 1991.

Ciencia y empresa

Materiales

La naturaleza por delante del arte

Terminaba el decenio de los sesenta, cuando la investigación militar cayó en la cuenta de la resistencia y elasticidad de la seda de la araña. Constituiría, se pensó, una soberbia defensa contra impactos bruscos. Pero ni siquiera los militares podían sufragar la compra de chalecos antibalas tejidos con telaraña para proteger a la tropa.

Podría haber muy pronto una opción alternativa. En vez de limitarse a aprovechar las materias naturales, como la seda, se está estudiando su estructura física, patrones seguidos y manufactura, en busca de indicios para crear materiales sintéticos dotados de propiedades fuera de lo corriente. La biomimética, disciplina de origen reciente que trabaja con materiales biomoleculares, no ha avanzado nada, pero los nuevos polímeros basados en la estructura de las proteínas están encendiendo el entusiasmo.

Los nuevos materiales constituyen ejemplo claro de las recompensas que aguardan a la convergencia interdisciplinar. Durante decenios, los químicos de polímeros han ideado compuestos combinando varios monómeros, o unidades a modo de ladrillos químicos en la edificación de aquéllos. Ahora bien, hasta el proceso de manufactura más cuidadosamente controlado termina en mezcla de cadenas poliméricas de longitud dispar, de lo que se resiente la calidad del producto final.

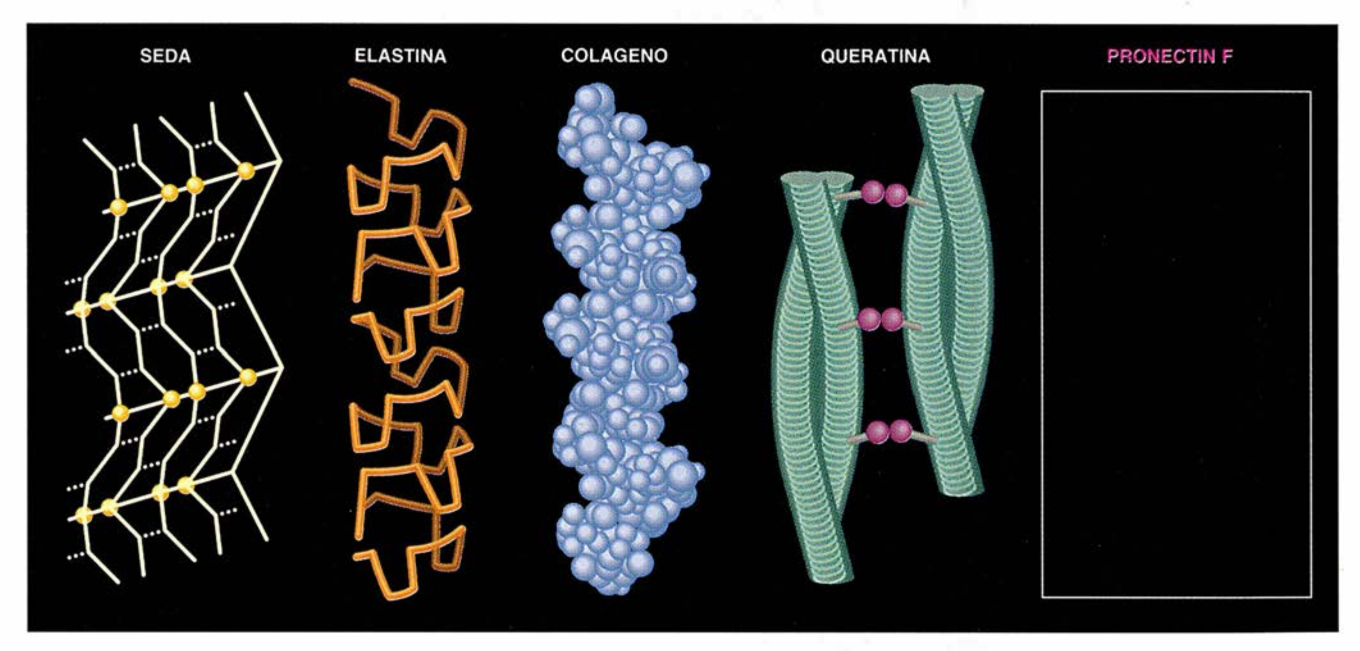
La ingeniería genética, por contra, se ha especializado en copiar exactamente las proteínas existentes. Insertando genes en microorganismos, se ha llegado a expresar, o producir, moléculas esencialmente idénticas. Esta clase de manufactura de precisión despierta la envidia de los químicos de polímeros. Recíprocamente, la ingeniería genética admira el proceder, unidad por unidad, de los químicos de polímeros. Las proteínas, como los polímeros, están constituidos por subsecuencias regulares, en este caso combinaciones de los veinte aminoácidos que se dan en la naturaleza.

Avanzando en esa convergencia se produjo ProNectin F, que se distribuye ya en forma de membrana transparente para el crecimiento celular. A partir de ocho aminoácidos dispuestos en secuencia precisa, el polímero incorpora receptores que lo capacitan para soldarse con plásticos (discos Petri, por ejemplo), resistir temperaturas muy altas y conservar su actividad durante meses. El siguiente en la lista de la compañía fabricante podría ser un recubrimiento para tejidos, empezando por las zapatillas de deporte. El recubrimiento de proteína debería dar a los tejidos artificiales una textura similar a la seda y mejorar su transpiración.

Por interesantes que puedan ser los polímeros basados en proteínas, se calcula que producir los primeros materiales costará miles de pesetas por kilo, precio muy alto para todas las aplicaciones excepto las de ensayo. Quienes investigan en ese dominio confían, sin embargo, en que, dentro de unos años, sus materiales a la carta entren en el mercado de productos biológicamente compatibles. De lo que se trata es de idear proteínas que no desencadenen una reacción inmunológica.

Los aires soplan hacia la fabricación de polímeros proteicos mediante el ensamblaje de diversas combinaciones de los 20 aminoácidos naturales en cuatro marcos genéricos que remeden la estructura de las proteínas naturales. Hablamos, en particular, de la seda, la elastina (que se encuentra en la piel y en otros órganos elásticos), el colágeno (componente fibroso de la piel y el tejido conjuntivo) y la queratina (que constituye las uñas y el cabello).

Otros prefieren comenzar por caracterizar con suficiente detalle las proteínas naturales y mejorar luego



CUATRO MODELOS DE PROTEINAS ELABORADAS ARTIFICIALMENTE, desarrolladas por los investigadores de Polymer Technologies, sirven de ladrillos para la construcción de nuevos polímeros de proteínas sintéticas, tales como el primer producto de la compañía (derecha).

las variaciones sobre esos temas. Dan W. Urry, director del laboratorio de biofísica molecular de la Universidad de Alabama en Birmingham, ha pasado veinte años estudiando la elastina, proteína tan flexible cuan resistente. Ha construido una serie de polipéptidos semejantes a la elastina basados en cinco aminoácidos. Las cadenas se pliegan naturalmente (o se contraen) en respuesta a la elevación de la temperatura; Urry los ha preparado también para reaccionar a ciertas concentraciones de productos químicos o variaciones de presión.

Las aplicaciones potenciales de tales materiales son variadísimas, sobre todo si se dejan programar su propia degradación. Por ejemplo, la cirugía abdominal requiere cortar primero y coser luego, por separado, cinco capas de tejidos. Para evitar que las capas se suelden al sanar, el cirujano podría separarlas con capas de polímeros que después se disolverían gradualmente. Los polímeros de Urry convierten una clase de energía en otra, a la manera de la conversión de energía química en mecánica; se podrían considerar, pues, una clase de micromáquinas.

En el centro de investigación y desarrollo Natick, del ejército norteamericano, y en la Universidad de Wyoming, se investiga la estructura de las poteínas de la telaraña. La seda, se dice, constituye un auténtico patrón oro. Los inventores del nylon, por ejemplo, se esforzaron por sacarle partido a los mismos enlaces químicos que sabían que existían en las proteínas de la seda.

No menos interés revestiría entender el hilado de la araña. Esta sintetiza una proteína soluble en agua y la arrolla formando una fibra más resistente e insoluble en dicho medio. Las fibras sintéticas, en contraste, se hilan frecuentemente a partir de ácidos fuertes y requieren técnicas especiales de procesado, tales como altas temperaturas.

El colágeno y la queratina tienen también quienes les emulen. Se investiga en muestras muy dispares, desde púas de erizo de mar y caparazones de langosta hasta dientes de rata, a la búsqueda de pistas sobre la confección de proteínas y la cristalización de materiales.

Hay quien aborda un planteamiento más radical. David A. Tirrell, de la Universidad de Massachusetts en Amherst, Maurille J. Fournier y Thomas L. Mason, de la Universidad de Massachusetts, no se contentan con los aminoácidos naturales: están elaborando los suyos propios, con el propósito de fabricar así un polímero fotoconductor.

Física cualitativa

Pros y contras

Si tomamos los fenómenos físicos que se abordan mediante ecuaciones diferenciales —por ejemplo, oscilaciones y realimentación— y los representamos a través de una notación descriptiva, la que podría dar un ingeniero, estamos en el terreno de la "física cualitativa". Las variables se pueden reducir a valores de más, menos o cero, para indicar si una magnitud física (verbigracia, el par de un motor) crece, cae o se mantiene inalterada.

A diferencia de los sistemas expertos convencionales, que fían en un conjunto de reglas del tipo "si..., entonces...", los basados en la física cualitativa se parecen a un modelo del diagrama de un circuito, en el cual un número bastante grande de componentes se comportan sólo de unas pocas maneras; por ejemplo, estado conectado-desconectado de un transistor. El reflujo y flujo de fuerzas representado por aproximaciones cualitativas puede usarse para trazar un camino esquemático para mostrar de qué modo el fallo de un elemento se propaga a los demás. En los sistemas expertos convencionales, se habría de formular una regla específica para cada uno de los componentes afectados.

La física cualitativa se inició hace unos 15 años, cuando Johan de Kleer, entonces en el Laboratorio de Inteligencia Artificial del Instituto de Tecnología de Massachusetts, ideó un programa cualitativo para resolver problemas sencillos de mecánica para los monopatines. Hoy, de Kleer supervisa un grupo de ocho personas que se especializa en el razonamiento cualitativo y las técnicas de modelado en el Centro de Investigación de Xerox en Palo Alto.

Allí, "Rapper" —el rap de Rapper significa procedimiento de reparación y ajuste (*repair and adjustment procedure*)— se funda en conceptos cualitativos para explicar por qué se ha estropeado una copiadora. Esa criatura constituye el modelo de los 170 componentes de que consta cierto tipo de copiadora; los componentes se hallan conectados a través de líneas que representan voltajes, pares de giro u otras magnitudes. Los investigadores de PARC estudian el modelo para producir una serie de diagramas de flujo que le ayude al técnico de mantenimiento en la localización del punto de la avería.

La construcción de un modelo que funcionase exigía simplificar las cosas. Se dejó aparte el tiempo. Cada componente identifica sólo el momento en que una hoja de papel pasa ante él. Prescindir del tiempo facilita cosas tales como razonar hacia atrás para determinar cuál de los sucesos anteriores pudo provocar la avería del motor.

A extramuros de Xerox, le han salido infinidad de aplicaciones al modelado cualitativo: desde crear libros electrónicos de autoenseñanza hasta informar a los pilotos sobre el estado de su motor. El detector de defectos, un sistema experto desarrollado en el Centro de Investigación Langley de la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA), toma las lecturas anormales de los sensores de un reactor y los introduce en un modelo cualitativo, que aporta un diagnóstico. El piloto ganaría mucho si, además de darle números, se le dijera con nitidez qué funciona mal o qué debe hacer; la compañía Boeing tiene en estudio un paquete informático de ese tenor para su incorporación a bordo de sus aviones.

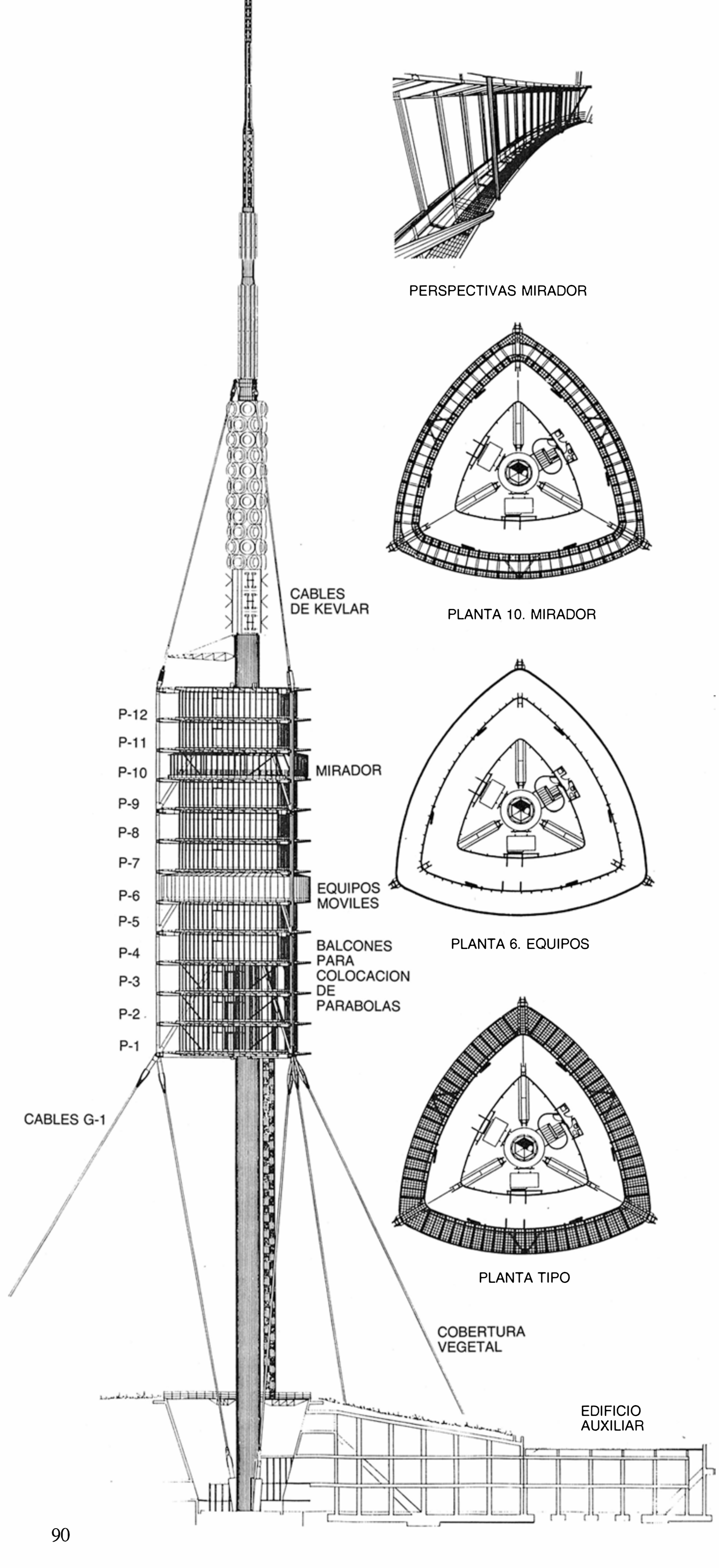
No faltan detractores de la física cualitativa. En un artículo que *Computational Intelligence* publicará este mismo mes de mayo, Elisha P. Sacks, profesor de ciencias de la computación en la Universidad de Princeton, y Jon Doyle, investigador del MIT, sostienen que la física cualitativa simplifica la dinámica hasta tal extremo que torna irresolubles los problemas del mundo real; los expertos en IA obrarían con mayor acierto, prosiguen, si encontraran algoritmos numéricos rigurosos.

Hay quien está ya tratando de combinar la física cualitativa con el modelado numérico formal. Una evaluación cualitativa podría escoger el mejor modelo numérico para ejecutar un problema. Al modelar la transición de régimen laminar a turbulento, por ejemplo, la física cualitativa le ayudaría a uno a decidir cuándo debe usar las ecuaciones del movimiento turbulento, opina Kenneth D. Forbus, profesor de ciencias de la computación en la Universidad Northwestern.

Torre de Collserola

Desafío a la ingeniería

En el horizonte barcelonés destaca la nueva torre de comunicaciones de Collserola, obra del arquitecto inglés Norman Foster. Su ubicación en lugar prominente, sobre el Turó de la Vilana, así como su original silueta, la convierten en un nuevo símbolo de la ciudad condal, junto a la Sagrada Familia o la estatua de Colón.



La torre de Collserola está llamada a desempeñar un papel decisivo en el futuro de la radiodifusión y las telecomunicaciones de Cataluña. Está previsto que, desde ella, emitan, entre otros, los dos canales de televisión pública estatal, los dos canales públicos de la comunidad autónoma, los tres canales privados de cobertura nacional, emisoras de frecuencia modulada estatales y autonómicas, red de telefonía móvil de Telefónica y multitud de empresas privadas con necesidad de circuitos propios de comunicaciones. Su privilegiado alojamiento permitirá dar servicio directo a unos 4,2 millones de telespectadores. Asimismo, las plataformas destinadas a la ubicación de parábolas posibilitarán una importante mejora de los radioenlaces fijos de múltiples compañías, además de la colocación de radioenlaces móviles.

Antecedentes

Ante el incremento de la demanda de emisión y transmisión de información que se registró al comienzo de los años ochenta, diversas compañías (Telefónica y TVE, entre ellas) formularon propuestas de erigir torres de comunicaciones. El ente público responsable, la Corporación Metropolitana de Barcelona (CMB), manifestó que sólo autorizaría la construcción de una única torre cuyas características permitiesen situar en ella el bosque de antenas que afean el paisaje. La nominación de Barcelona como sede olímpica, y las presumibles exigencias informativas que en torno a los juegos nacerían, aceleraron los trámites. En 1987 se creó la sociedad promotora "Torre de Collserola S.A." (TCSA).

En noviembre de 1987 se convocó un concurso de ideas, internacional. Se invitó a 6 grupos, siendo cuatro las propuestas que finalmente se recibieron (la de los estudios de Ricardo Bofill, Joan Margarit-Carles Buxadé, Santiago Calatrava y Norman Foster). El jurado falló en junio de 1988; otorgó el premio a la propuesta del británico Norman Foster, quien la había presentado en colaboración con la oficina de ingeniería OVE ARUP.

Una vez fallado el concurso, TCSA encargó al equipo Foster-ARUP el desarrollo más detallado de la propuesta. Este equipo se centró en el dimensionado estructural de su propuesta y en la definición de la arquitectura y requerimientos visua-

ALZADO Y PLANTAS de la torre de Collserola.

les que debía tener el proyecto. Realizaron estudios en túnel de viento con maquetas de la torre y de la topografía del terreno para comprobar la viabilidad aerolástica del proyecto y determinar los esfuerzos de viento, según la dirección en que actúa. Estudiaron el comportamiento en seísmo de la estructura, además de otros azares, como la rotura de un cable de atirantamiento. Todo ello obligó a cierto reajuste del proyecto inicial, con cambios como la duplicación de los tirantes inferiores (6 en vez de 3) y otros.

La documentación preparada por Foster-ARUP dejaba abiertos muchos aspectos del proyecto. Quería que la empresa adjudicataria de las obras se responsabilizara de la realización de la ingeniería de detalle. Se hizo así para permitir el ajuste del proyecto a la secuencia constructiva que proponga el contratista, que se intuía habría de ser el auténtico caballo de batalla de la obra. Se contrató a CAST, sociedad de ingeniería española, para que preparase, con la información suministrada por Foster-ARUP, la documentación necesaria para la licitación, completase el proyecto en lo relativo a instalaciones, edificio auxiliar y urbanización y asumiese la dirección de la obra.

Complejo proyectado

La estructura en su conjunto consta de la torre, de 287 metros de altura desde el cimiento, más un edificio semisoterrado de apoyo que contiene los transmisores. La torre es de una extraordinaria elegancia en su concepción estructural. Constituye una mezcla de las tradicionales torres de televisión con el fuste de hormigón exento y los mástiles metálicos atirantados propios de las antenas de radiodifusión.

Los elementos básicos que la integran, descritos de arriba abajo, son los siguientes: extremo superior coronado por una pequeña grúa; fuste de celosía de acero, destinado a antenas de telefonía móvil; fuste de tubo metálico para antenas de UHF; fuste de hormigón, que, por encima de la planta 13, presta soporte a las antenas de VHF y FM (en esta parte está arriostrado por tres cables de aramida para no distorsionar el campo radioeléctrico), entre las cotas 13 y 64 se desarrollan 13 plataformas de 429 metros cuadrados cada una para soporte de parábolas de radioenlaces, y en su extremo inferior está arriostrado por los conjuntos de cables de acero G1 (seis) y G2 (tres); foso en forma de cono invertido de unos 20 metros de diámetro y 20 de profundidad, de donde arranca el fuste de la torre.

Cada elemento opera de acuerdo con las características que le son propias: el acero a tracción, el hormigón a compresión, fibras de aramida para los atirantamientos superiores, donde no puede utilizarse el acero por interferir las radiaciones electromagnéticas. Se aprovechan todos los recursos que nos ofrece la resistencia de materiales para obtener una estructura esbelta, y éstos se emplean en el límite de lo razonable comercialmente: hormigón del fuste de alta resistencia (480 kilopounds por centímetro cuadrado), acero A52, cables de postesado de 26.000 kilopounds por centímetro cuadrado de resistencia a la rotura, etcétera.

La hábil disposición de los atirantamientos de cable y de la estructura de las plataformas favorece la rigidez del conjunto, a pesar de la extrema delgadez del mástil de hormigón. De acuerdo con los requerimientos del concurso, la estabilidad tiene que ser tal, que un viento huracanado de 100 kilómetros por hora no mueva ninguna de las plataformas más de 1/8 de grado en cualquier dirección, una condición sumamente restrictiva.

El fuste de hormigón tiene un diámetro exterior de 4,5 metros y de 3 metros los interiores, de tal modo que, por dentro, sólo pueden colocarse los cables guía-ondas, que transmiten las señales de televisión y FM desde los transmisores instalados en el edificio auxiliar, sito en la base, hasta las antenas, dispuestas en la parte alta del fuste, por encima de las plataformas, además de una escalera de gato de servicio. El resto de las comunicaciones verticales tiene lugar por la parte exterior del fuste, donde existen un ascensor, un montacargas y una escalera metálica.

Secuencia constructiva

En la torre se conjugan dos conceptos distintos. Por un lado, está el proyecto final, es decir, cómo debe ser la torre terminada, con todos los elementos en funcionamiento para el fin que se les ha asignado; se trata, básicamente, del trabajo de Foster-ARUP. Por otro lado, el proyecto de cómo construirla de suerte tal que garantice la estabilidad de todos los estados intermedios; esta misión corresponde al adjudicatario.

La segunda parte no es tarea menor. Para hacernos una idea, citemos algunas dificultades que presentaba el proyecto. El fuste de hormigón, por ejemplo, tiene una longitud de 205 metros. Con esa altura y un diámetro de sólo 4,5 metros en la base, no es estable si no se arriostra en puntos intermedios; la máxima altura exenta que es capaz de resistir se halla en torno a los 120 metros. Asimismo, la estructura metálica portante principal de las plantas está constituida por elementos que pesan en muchos casos más de 20 toneladas; se requieren unos medios de elevación poderosísimos para colocar esos elementos en posición a unas alturas que oscilan entre los 84 metros de la primera plataforma y los 152 de la última. Por fin, los extremos superiores de la torre, es decir, el mástil de tubo metálico y el de celosía, deben colocarse a una altura que se halla fuera del alcance de cualquier grúa móvil.

La obra se adjudicó a Cubiertas y Mzov S.A. (CMZ). La secuencia constructiva que CMZ ha adoptado consta de las siguientes operaciones:

a) Construcción mediante encofrado deslizante del fuste cilíndrico de hormigón hasta su coronación en la cota 185. Al alcanzarse la cota 27 se procede a la introducción del tubo y mástil de celosía en el fuste de hormigón para posteriores telescopados; para dar estabilidad al fuste se han colocado tres niveles de arriostramiento provisional (cotas 70, 160 y 185).

b) Construcción apoyada en el suelo de la estructura metálica de las plataformas. Se modificó el diseño original introduciendo un pilar interior para hacer estable el sistema mientras se montaba; gracias al pilar, se han podido construir las 13 plataformas en el suelo como si se tratara de una edificio normal.

c) Supresión del primer nivel de arriostramiento provisional, e izado tirando desde la cota 185 del tubo y mástil hasta la parte superior del fuste sin salir al exterior.

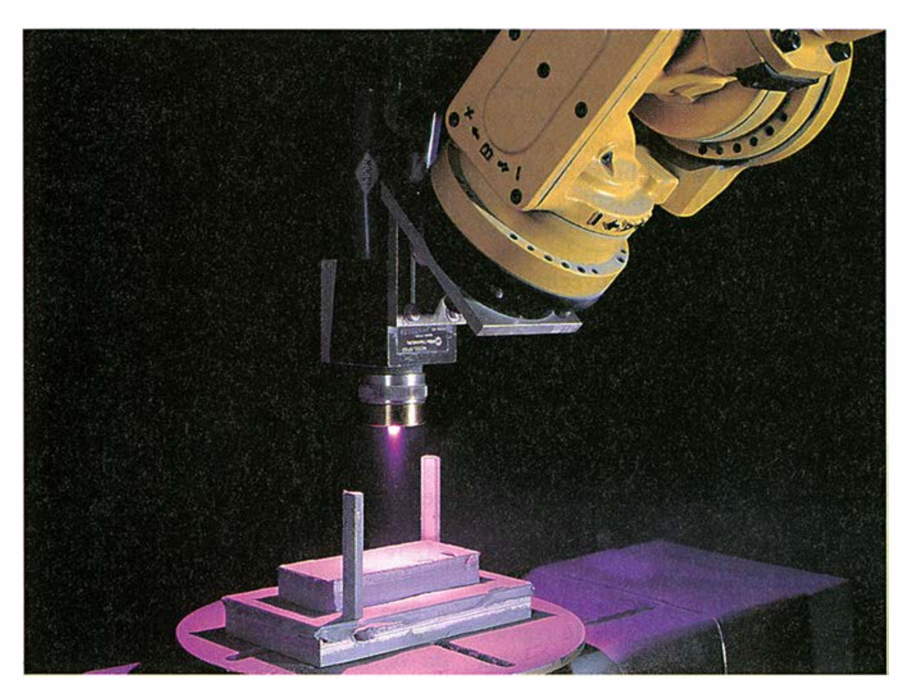
d) Izado de las plataformas metálicas tirando mediante gatos desde la cota 185. Soldadura de la estructura metálica al fuste.

e) Colocación de cables de atirantamiento definitivo G1 y G2, y supresión de los tirantes provisionales.

f) Colocación de cables G3 de fibras artificiales.

g) Telescopado del mástil de celosía dentro del tubo metálico y finalmente telescopado de ambos hasta la posición definitiva.

La firma CMZ aporta innovaciones de interés tecnológico a la construcción. En primer lugar, la aplicación de las técnicas del postesado a los cables de atirantamiento, tanto provisionales como definitivos. El proyecto inicial preveía cables espirales cerrados normales, pero éstos tendrían una sección que los haría absolutamente inmanejables. Los cables G2 han de alcanzar una sección de acero



CAPA POR CAPA, un cañón pulverizador de metal en la Universidad Carnegie Mellon construye un modelo de una pala de turbina de zinc. Foto: Jim Schafer.

de unos 350 centímetros cuadrados, unos 25 cm de diámetro. Las bobinas de arrollamiento que harían falta para su transporte tendrían un diámetro tal, que no hubieran circulado por ninguna carretera; la solución ideada fue emplear cables de postesado de 15 mm de diámetro colocados en paralelo y tensados uno a uno formando un conjunto que tiene la sección necesaria; van galvanizados, engrasados con cera de petróleo y enfundados en polietileno para asegurar su larga duración.

En segundo lugar, los cables G3 están constituidos por 7 cables, de aramida y funda de polietileno, colocados en paralelo. Rompen a unos 11.500 kilogramos por centímetro cuadrado. Por fin, innovación destacada es el conjunto de elementos utilizados para el izado de las plataformas metálicas de las plantas, así como del tubo metálico y la celosía.

(Ramón Pedrerol Jardí, ingeniero industrial y arquitecto, director facultativo de las obras por CAST S.A.)

Taller de sobremesa

¿Vuelve el ingeniero habilidoso?

"Lo habitual antes era que la gente proyectase las piezas y pasara luego al torno o la forja para hacerlas directamente", dice Emmanuel Sachs, profesor de ingeniería mecánica del Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). No había solución de continuidad entre el proyecto y el acabado, ni siquiera de personas.

La nueva técnica de fabricación de sobremesa se apresta a transformar, de nuevo, los ingenieros en artesanos. La creciente potencia de los ordenadores personales puede permitir muy pronto que el ingeniero "imprima" componentes terminados con la misma facilidad con que se imprime un dibujo industrial. El sistema ahorra semanas o meses en la fabricación del prototipo. Y podría facilitar la confección de piezas reales en pequeñas series desde las pantallas.

Ejemplos de fabricación de sobremesa son los prototipos de plástico, merced a los cuales los ingenieros ponderan la idoneidad y el aspecto de una pieza. Cierta empresa radicada en la Valencia californiana ha vendido ya cientos de máquinas para producir prototipos a partir de la estereolitografía. A la manera de la impresora de un ordenador, el sistema toma un conjunto de coordenadas para controlar la posición de un láser ultravioleta. El láser fabrica capas de plástico de unas centésimas de milímetro de espesor, trazando cortes verticales sucesivos del componente sobre la superficie de un baño de un polímero líquido. El proceso está abierto a cualquier producto, desde el prototipo del bloque de un motor a un modelo de un hueso de cadera enfermo construido según las informaciones aportadas por un dispositivo automático de exploración médica.

Estos prototipos de plástico no distan demasiado de las posibilidades del aficionado. Los plásticos pueden conformarse mediante un láser con las tolerancias requeridas; en algunas ocasiones sirven incluso de componentes reales. Muchos, hechos de metal, se comportan de forma distinta de como responden los plásticos cuando se les somete al calor o las vibraciones. Un colector de escape para un motor de reacción, fabricado de plástico, no podemos exponerlo a una prueba de temperatura.

Así las cosas, la Fundación Nacional norteamericana de Ciencia (NSF) y varias compañías financian la construcción de piezas y prototipos a partir de una amplia gama de materiales, del acero a la cerámica. El equipo de Sachs, por ejemplo, trabaja, en el MIT, en el desarrollo de la impresión tridimensional. En esta técnica, se parte de un dibujo en tres dimensiones ayudado por ordenador y se corta en delgadas rebanadas; un inyector, semejante a los que se usan en ciertos tipos de impresora, lanza un chorro de un producto químico adhesivo sobre un lecho de cerámica en polvo, acero inoxidable u otro metal. Después de repetir este proceso con centenares de capas, el componente semisólido se lleva a un horno.

La tecnología del MIT la está empleando, bajo licencia, Solingen, compañía dedicada a la venta de máquinas para moldes de cerámica: tras solidificar el polvo cerámico, se funde metal en el molde resultante. Conocida como CAD-Casting, la técnica evita el trabajo de fabricar matrices de metal para producir modelos de cera que se sumergen después en cerámica semiderretida para crear el molde.

Lee E. Weiss y Fritz B. Prinz se aprestan a construir piezas de metal con pareja densidad que las obtenidas a través del proceso habitual de fundido y fresado. Se proponen adaptar una técnica usada en la industria aeroespacial para pulverizar capas de cerámica sobre componentes de metal. Se sirven de un láser de dióxido de carbono de baja potencia para cortar plantillas; luego, un cañón de pulverizado térmico, controlado por robot, deposita una capa de no más de una décima de milímetro de espesor en las aberturas de la plantilla de estarcido. Tardaron seis minutos en fabricar cada una de las 162 capas que forman el modelo de zinc de una pala de turbina.

En la Universidad de Texas se está explorando la posibilidad de emplear un láser de dióxido de carbono de alta potencia, de 1100 watts, para fundir polvos de metal o cerámica de manera similar a lo experimentado allí mismo con termoplásticos.

Taller y laboratorio

Jerry Silverman, Jonathan M. Mooney
y Freeman D. Shepherd

Similares a las videocámaras domésticas, las de infrarrojos "ven" la radiación térmica

Las metáforas en que se asocia la luz con el calor y la oscuridad con el frío son comunes. La realidad las respalda: los objetos calientes emiten más radiación que los fríos. Además, esa radiación está en buena parte compuesta de luz visible, mientras que los cuerpos fríos despiden radiación infrarroja.

La diferencia entre la cantidad y tipo de radiación que emiten los cuerpos fríos y calientes constituye la base de una tecnología naciente: la videocámara infrarroja. Como el ojo humano responde bien a la luz visible y mal a la radiación infrarroja, una buena parte de la información que sobre sí mismo emite un objeto codificada en su radiación infrarroja se pierde. Una videocámara infrarroja es capaz de captar esa información y transformarla en imágenes visibles por el ojo humano. Una de las tecnologías de vídeo infrarrojo ya a punto se basa en el siliciuro de platino. Las cámaras de siliciuro de platino se parecen en muchos aspectos a las videocámaras domésticas, sólo que son sensibles a las largas longitudes de onda propias de la radiación infrarroja, comprendidas entre uno y 5,7 micrometros (milésimas de milímetro), pero no a las propias de la luz visible, que son más cortas y van de 0,4 a 0,7 micrometros.

Las aplicaciones de las videocámaras infrarrojas son obvias en el campo de la visión nocturna, el reconocimiento y vigilancia y la identificación y asignación de blancos. Podrían también servir de ayuda al control del mecanizado con láser y a la visualización del flujo térmico en los fluidos. Pero acaso el mejor haber de estas nuevas cámaras resida en su capacidad para complementar la información dada por las imágenes visibles. Este mismo papel ya lo representan otras tecnologías infrarrojas en las industrias eléctrica, de la construcción y petroquímica. Se han utilizado también para detectar fugas y distribuciones de esfuerzos mecánicos, controlar la contaminación por combustibles, levantamientos topográficos y análisis clínicos. Por otra parte, aunque las técnicas de formación de imágenes infrarrojas ya existentes sean muy útiles, las cámaras de siliciuro de platino ofrecen la posibilidad de conseguir imágenes de buena calidad. Se han empleado incluso para atisbar en el interior de regiones distantes del universo que de otro modo seguirían ocultas por el polvo interestelar.

El descubrimiento de la radiación infrarroja se remonta a principios del siglo XIX, cuando el astrónomo inglés Sir William Herschel demostró su existencia descomponiendo la luz solar en bandas espectrales mediante un prisma. Desplazando un termómetro a través de las bandas, descubrió que la temperatura iba creciendo entre los extremos azul y rojo del espectro. Y lo que es más, la temperatura seguía subiendo pasado el rojo, donde ya no había luz visible. Aquella luz no visible ubicada después del extremo rojo acabó denominándose luz infrarroja.

El físico alemán Max Planck, uno de los fundadores de la mecánica cuántica, asentó el descubrimiento de Herschel sobre una base firme al formular su teoría de la radiación del cuerpo negro; según esta teoría, la radiación electromagnética emitida por unos cuerpos ideales, llamados cuerpos negros, se caracteriza por ser función de la temperatura. (El cuerpo negro absorbe íntegramente toda radiación incidente.) Según la teoría de Planck, la radiación emitida por un cuerpo negro a la temperatura ambiente se hace máxima a las longitudes de onda cercanas a los diez micrometros y es despreciable para las longitudes de onda inferiores a dos micrometros. Para relacionar esto con nuestra experiencia cotidiana, imaginemos un hornillo eléctrico encendido, que emite calor antes de que la resistencia espiral empiece a enrojecer, lo que corresponde a la porción de longitud de onda más corta de la radiación emitida. Si fuera posible seguir calentando la resistencia, el resplandor se haría más intenso y el color se desplazaría hacia el amarillo y luego el azul, a medida que se acentuara el predominio de las longitudes de onda más cortas.

Aunque la radiación infrarroja y la luz visible forman ambas parte del espectro electromagnético, las imágenes de emisión térmica que captan las cámaras infrarrojas difieren esencialmente de las imágenes visibles que inundan nuestra vida diaria. En estas últimas se capta la luz reflejada por los objetos, procedente de una fuente exterior, y se puede obtener un fuerte contraste que va desde el blanco hasta el negro. En cambio, las imágenes infrarrojas recogen la radiación emitida por los objetos en función de su temperatura y por ello son en esencia la impresión o el registro de la configuración de las temperaturas de la escena observada. Ahora bien, los cuerpos reales difie-

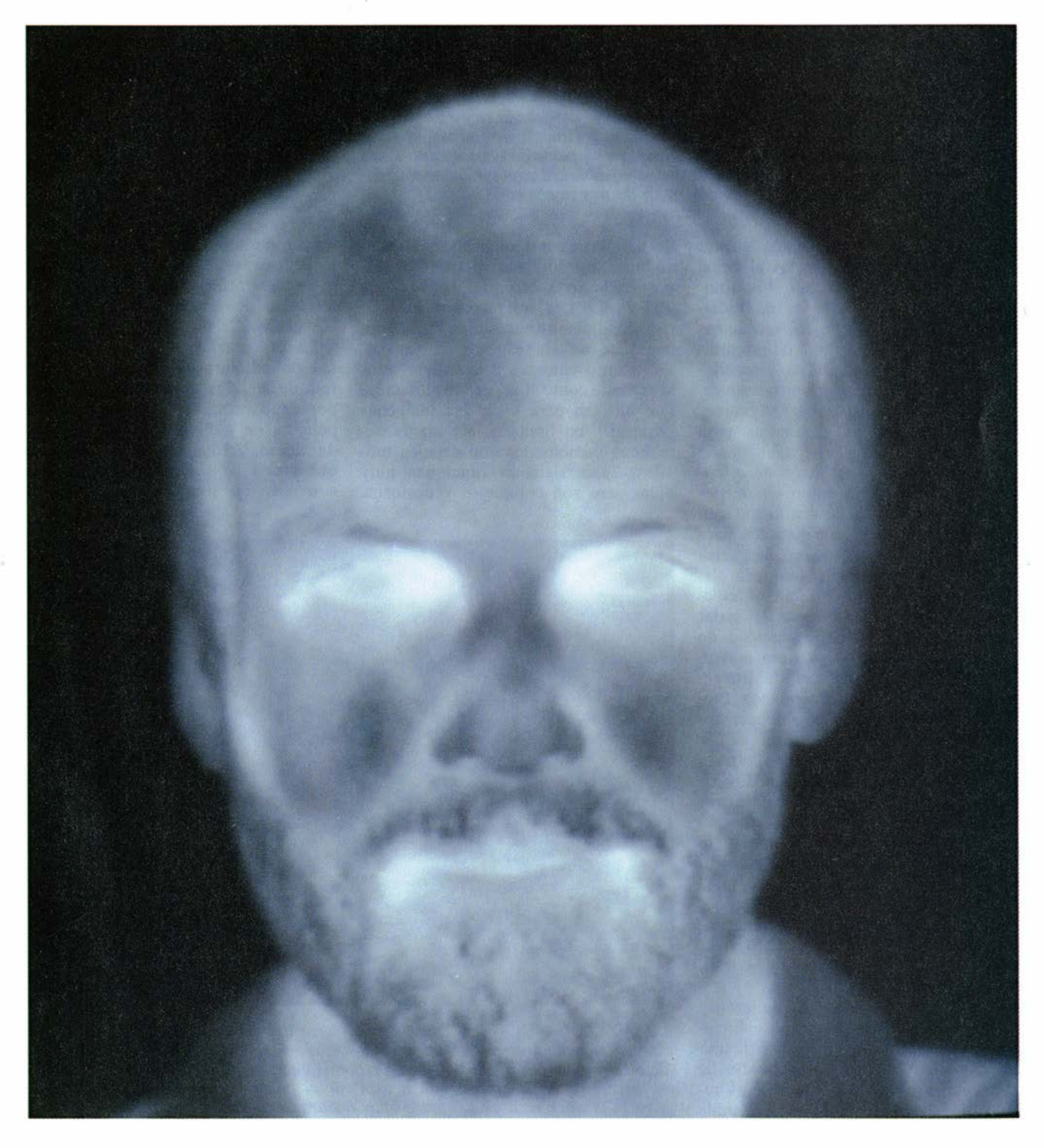


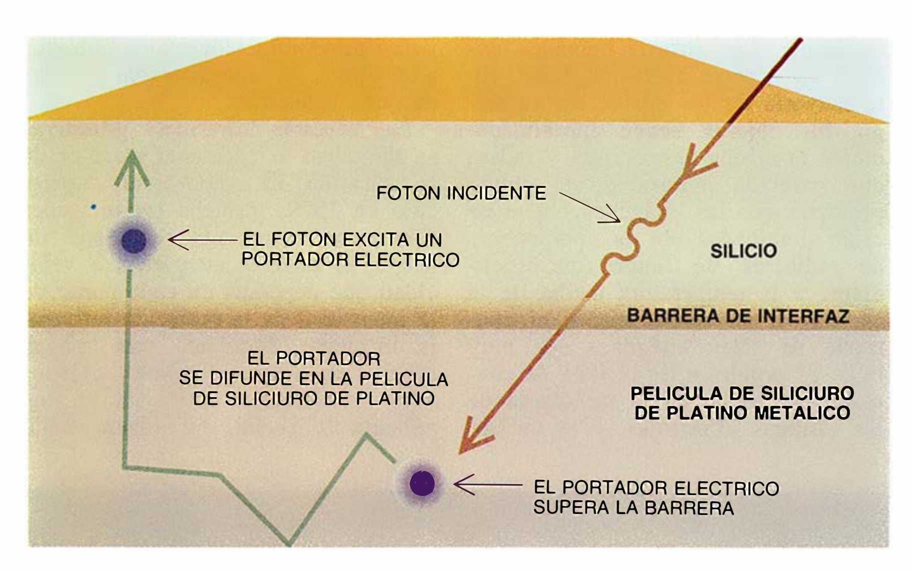
1. LOS ROSTROS vistos al infrarrojo adquieren una apariencia espectral. Comparamos aquí a uno de los autores (Mooney) fotografiado con luz visible (arriba) *y con luz infrarroja* (derecha). *Las características familiares, tales como el color de los ojos o del cabello, no aparecen en las fotos infrarrojas, mientras que se acentúan los rasgos térmicos. La nariz y las orejas suelen estar más frías (en la foto más oscuras) que el resto de la cara, y más calientes las cuencas de los ojos. La apariencia de las ventanas de la nariz y la boca varía, según que el sujeto esté inspirando o expirando.*

ren del cuerpo negro ideal y emiten menos radiación que la predicha por Planck. Además, muchas veces hay presentes a la vez radiaciones emitidas y reflejadas. Estos dos efectos tienden a complicar la relación entre el brillo de un objeto visto en su imagen térmica y la verdadera temperatura de ese objeto.

Las imágenes infrarrojas son desconcertantes, al apartarse radicalmente de nuestro entorno visible. Se aprecia, sobre todo, en ausencia de luz solar: escenas nocturnas o de interiores. Los rostros humanos cobran un aspecto fantasmagórico. En la mayoría de los casos, sin embargo, los objetos tienen aproximadamente la misma temperatura y radian con parecida intensidad, de donde proviene que las imágenes obtenidas estén dominadas por la componente de radiación de fondo (correspondiente a la temperatura media de la escena) y, en consecuencia, el contraste de tales imágenes sea muy bajo. El problema de la falta de contraste es crucial en la tecnología de las cámaras infrarrojas, y es un objetivo prioritario reducirlo a términos admisibles, en comparación con las cámaras ordinarias.

Las cámaras infrarrojas primitivas se limitaban a reaccionar al calor de la radiación. El evaporógrafo, aparecido en 1929, formaba las imágenes sobre una membrana recubierta de aceite, el cual se evaporaba a velocidad que dependía en cada punto de la intensidad de la radiación infrarroja incidente, formando una imagen térmica de colores variantes debidos a la interferencia óptica en la fina película de aceite, del mismo modo





2. DETECTOR INFRARROJO DE SILICIURO DE PLATINO (sección transversal). Se compone de una película fina de siliciuro de platino depositada sobre un sustrato de silicio. La absorción de los fotones infrarrojos, o cuantos de radiación, en el siliciuro de platino excita portadores eléctricos, y una parte de ellos escapa hacia el silicio, constituyendo una corriente eléctrica medible. El espesor óptimo de la película de siliciuro es del orden de tres nanómetros.

que se ven aparecer colores en las capas de aceite superpuestas al agua.

Detectando directamente los fotones infrarrojos, o cuantos de radiación, se han conseguido respuestas más rápidas y mayores rendimientos. Los detectores basados en este concepto se llaman detectores cuánticos, y fueron empleados por los alemanes en la segunda guerra mundial, para detectar barcos en el canal de la Mancha y tanques en el frente oriental. Tanto Alemania como Gran Bretaña comenzaron a desarrollar sensores infrarrojos aerotransportados para detectar bombarderos, pero la guerra terminó sin haber conseguido un sistema operativo y los británicos remataron su programa en favor del radar aerotransportado, cuya capacidad de penetración meteorológica era mayor. Los primeros formadores de imágenes infrarrojas norteamericanos fueron el Sniperscope y el Snooperscope, basados en los tubos 1P25, detectores cuánticos creados por la RCA durante los años treinta. En estos dispositivos la radiación infrarroja incidía en un cátodo (electrodo negativo) en el interior del tubo, lo que provocaba la emisión de electrones al vacío. Sin embargo, el 1P25 era incapaz de detectar los fotones emitidos por los objetos a temperatura ambiente, pues los cátodos metálicos no eran sensibles a los fotones de baja energía.

En los veinte años que siguieron a la segunda guerra mundial, se hicieron numerosos intentos para extender al campo infrarrojo la tecnología de las cámaras de televisión. En el infrarrojo cercano (longitudes de onda de uno a tres micrometros) se alcanzó un éxito limitado, pero los ensayos en la zona espectral situada más allá de los tres micrometros fracasaron totalmente por culpa del bajo contraste de las escenas infrarrojas. Se recurrió entonces a investigar otros sistemas, como los de exploración, que utilizan para crear las imágenes infrarrojas un limitado número de detectores combinados con espejos móviles. Tales sistemas funcionan muy bien, pero son complejos y costosos.

En 1973, Andrew C. Yang, perteneciente al que hoy se llama Laboratorio Rome de la Fuerza Aérea, y uno de los autores (Shepherd) propusieron una tecnología de sensores infrarrojos basada en un proceso de detección similar al utilizado en los tubos 1P25, aunque con la crucial diferencia de que los electrones emitidos no son lanzados al vacío sino al silicio. Este proceso se denomina fotoemisión interna. La propuesta se apoya en el hecho fundamental de que ciertos metales, como el platino, reaccionan con el silicio para formar un cátodo de siliciuro metálico, dotado a la vez de la respuesta espectral correcta y la uniformidad espacial necesarias para formar imágenes térmicas de gran calidad.

La demostración práctica de las primeras cámaras infrarrojas basadas en fotoemisión interna data de mediados de los años setenta. Desde entonces esta tecnología ha evolucionado sin pausa. Los sistemas actuales tienen una resolución mayor que las cámaras de televisión normales y pueden reflejar en la imagen diferencias de temperatura inferiores a 0,2 grados Celsius.

En el corazón de todas las cámaras de siliciuro de platino hay una red de células detectoras obtenidas por deposición al vacío de una fina película de platino sobre un sustrato de silicio. Al calentar fuertemente la oblea con su película, el platino se convierte en siliciuro de platino. El



3. FOTOGRAFIAS INFRARROJAS de la torre del reloj de la Aduana de Boston y área circundante tomadas en un día soleado (izquierda) *y en una noche clara* (derecha). *No existen focos visibles predominantes, sobre todo las luces interiores en los edificios, lo cual ayuda a explicar el parecido general de ambos fotogramas. A diferencia de las fotografías nocturnas comparadas con las diurnas en*

interfaz resultante entre el siliciuro de platino, metálico y conductor, y el silicio, semiconductor, recibe el nombre de diodo Schottky (en honor del físico alemán Walter Schottky). Este diodo constituye una "barrera de potencial" que, sin luz y a baja temperatura, deja pasar muy pocos portadores eléctricos desde el metal al semiconductor. Los fotones infrarrojos, por su parte, cuando son absorbidos por el metal pueden excitar algunos portadores hasta una energía superior al potencial de la barrera. Este proceso de fotoemisión de portadores para rebasar la barrera de Schottky se asemeja a lanzar balones cuesta arriba hasta sobrepasar la cresta de un montículo. La fracción de portadores que logran escapar forman una corriente eléctrica medible; la tasa de éxitos en el cruce de la barrera depende de muchos factores: espesor y estructura de la película, longitud de onda de la radiación y altura potencial de la barrera.



4. CAMARA DE SILICIURO DE PLATINO tomando la imagen de la persona que realizó el cableado. En la imagen de la pantalla del monitor se ve la marca que deja la mano al tocar la cara. Junto al monitor está la caja de mandos para enfocar y ajustar la imagen. El chasis plateado de la cámara es un dewar que refrigera la red de 39.040 detectores (no vista). La red y el circuito de lectura caben en una pastilla del tamaño de una moneda pequeña.

Las cámaras reales contienen un gran número de diodos Schottky, de unos 25 micrometros de lado que forman un retículo bidimensional en una pastilla de silicio. Esta comprende también un circuito electrónico mediante el cual puede leerse la corriente que sale de cada diodo. Para visualizar la imagen de vídeo, la señal eléctrica procedente de cada diodo se convierte en una intensidad de iluminación en la pantalla de un monitor. La red de diodos y su circuito de lectura se obtienen con las técnicas habituales en la fabricación de elementos de estado sólido, consiguiendo así unos productos económicos y de alta calidad.

Dos inconvenientes atemperan un tanto las ventajas ofrecidas por el siliciuro de platino. Primero, para funcionar el dispositivo debe enfriarse hasta la temperatura del nitrógeno líquido (−196 °C). Segundo, el rendimiento de cada diodo al convertir la señal infrarroja en señal eléctrica es bastante bajo, inferior al uno por ciento. En otros tiempos, el requisito de la baja temperatura se consideraba una dificultad grave; sin embargo, los últimos avances en cámaras criogénicas han reducido las repercusiones de este problema. El escaso rendimiento del dispositivo, que en los comienzos hizo que muchos investigadores descartaran los diodos Schottky como detectores infrarrojos, está parcialmente compensado por el hecho de que cada diodo "contemple fijamente" el mismo pequeño sector de la escena. No obstante, el empleo de millares de detectores atribuye un extraordinario valor a la uniformidad de la respuesta de un detector a otro de la red. La comparación del siliciuro de platino con otras tecnologías modernas posibles revela que la uniformidad y el rendimiento van en relación inversa, y de ahí resulta que la adaptación de la tecnología a las aplicaciones sea tema de controversia.

Uno de los retos primordiales en el diseño de videocámaras infrarrojas reside en la conversión de las señales eléctricas generadas por los diodos en intensidades de iluminación. En el caso de las imágenes visibles, la correspondencia lineal directa entre la señal primaria y la escala de visualización acostumbra rendir una imagen que satisface las expectativas del observador. Pero, como ya se ha apuntado, no sucede lo mismo con las imágenes infrarrojas; en una imagen visible, entre los puntos más iluminados y los más oscuros, el nivel de la señal puede variar en un factor de hasta 1000, mientras que en las escenas infrarrojas normales los niveles de las señales emitidas varían



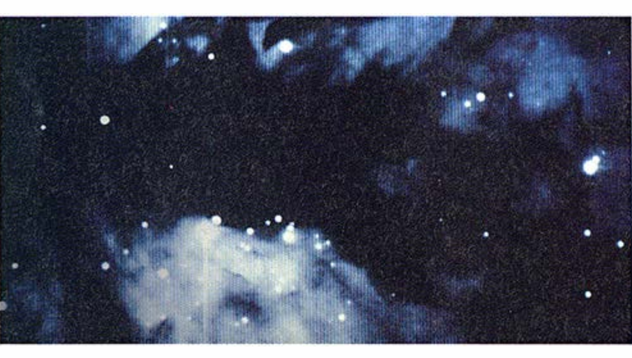
luz visible, la apertura del diafragma y velocidad de obturador fueron iguales en las dos fotografías mencionadas (f/2,0, 1/30 seg.). Se utilizó una cámara infrarroja diseñada en el laboratorio de los autores en la Base Aérea de Hanscom, la cual está equipada con una red de 160 × 244 detectores construida en los laboratorios David Jarnoff.

en un factor de dos como máximo. Este bajo contraste de las imágenes infrarrojas magnifica la influencia de las fuentes de ruido, las cuales de otro modo no se harían notar. Existen varios procedimientos para convertir las señales primarias en imágenes.

Otro importante desafío en la construcción de cámaras infrarrojas es la reducción al mínimo de los parásitos, en general englobados en la denominación de ruido, y que son fluctuaciones de señal indeseadas. (Según los ingenieros electrónicos, los parásitos forman junto con la muerte y los impuestos una trilogía fatal.) El ruido se presenta en dos variedades: temporal y espacial. El ruido temporal contamina la imagen confiriéndole un aspecto granuloso, como de "sal y pimienta". Por suerte, su causa es la aleatoriedad intrínseca a la llegada y detección de los fotones infrarrojos, y dado que la intensidad del ruido aumenta con la raíz cuadrada del tiempo de medición mientras que la intensidad de la señal aumenta linealmente, es posible mejorar la relación señal/ruido aumentando dicho tiempo de medición, y en consecuencia reducir el ruido temporal.

Tras haber aminorado el ruido temporal, subsiste el segundo problema: el ruido espacial. Su origen está en que los detectores no dan una respuesta uniforme a los rayos infrarrojos, que sí son uniformes. Podría decirse que el ruido espacial representa en la pantalla la "huella dactilar" de las diferencias entre los detectores. Hay varias técnicas informatizadas capaces de reducir este efecto, aunque hasta ahora ninguna es del todo satisfactoria. El procedimiento más sencillo consiste en sustraer, de las sucesivas formaciones de imágenes, la imagen que se obtiene con la cámara sometida a una iluminación uniforme. Una ventaja importantísima de los diodos Schottky es que el conjunto de faltas de uniformidad intrínsecas es lo bastante reducido y lo bastante estable para permitir su corrección en tiempo real.

Las investigaciones futuras acerca de las videocámaras infrarrojas se centrarán con toda seguridad en el perfeccionamiento de la tecnología actual, buscando extender la respuesta de la cámara a longitudes de onda infrarrojas todavía más largas. Para lograr este propósito, el enfoque ideal consiste en dominar la tecnología de fabricación de redes de dispositivos detectores de gran rendimiento y gran uniformidad intrínseca. Sin embargo, el comportamiento de estos detectores idealizados lo establecería no nuestra habilidad, sino la naturaleza, es decir, el ritmo aleatorio con que llegan los fotones infrarrojos. Aunque tales dispositivos sean hoy tan corrientes como los burros voladores, lo que ahora es un sueño podría muy bien convertirse en realidad algún día.





5. POLVO INTERESTELAR que oscurece la NGC 2024 (izquierda), *región de formación de estrellas contigua al cinturón de Orión y a la nebulosa Cabeza de Caballo. Con su capacidad de penetración, la radiación infrarroja proporciona una vista muy diferente de la región* (derecha). *En la fotografía infrarroja los colores se consiguieron obteniendo imágenes en tres longitudes de onda diferentes (1,2, 1,6 y 2,2 micrometros) a modo de componentes azul, verde y rojo de una imagen generada por ordenador. Esta fotografía, que ofrecemos por cortesía de Ian Gatley, Albert M. Fowler y K. Michael Merrill, fue tomada con el telescopio de 1,3 m del Observatorio Nacional de Kitt Peak empleando una red de siliciuro de platino.*

El calor lo captamos por la piel y, como en el caso de los espejismos, podemos percibir sus efectos de otros modos. Gracias a la radiación infrarroja que emiten los cuerpos calientes, podemos detectarlos por uno de esos otros modos. La mayoría de los sensores infrarrojos son complejos dispositivos de estado sólido. Yo he desarrollado un procedimiento para construir una cámara infrarroja sencilla con un espejo esférico y un cristal líquido. Aunque mi aparato no sea, ni con mucho, tan sensible como los últimos modelos, puede captar la radiación infrarroja procedente de un objeto situado a uno o dos metros de distancia. Compré entonces un espejo de buena calidad, unos cuantos cristales líquidos dotados de óptima sensibilidad al calor y las piezas de un soporte rígido para el espejo y los cristales líquidos.

El componente más caro es el espejo. Su tamaño y calidad determinan el poder separador de la cámara. Me decidí por un espejo con baño de oro de 15 cm de diámetro y una distancia focal de 30 cm. El baño de oro refleja bastante radiación infrarroja y absorbe parte de la radiación visible.

Aplicando principios elementales de óptica, deduje el tamaño y la distancia focal del espejo. Calculé primero dónde enfocar la imagen con respecto al objeto; la distancia imagen se obtiene luego con la fórmula siguiente:

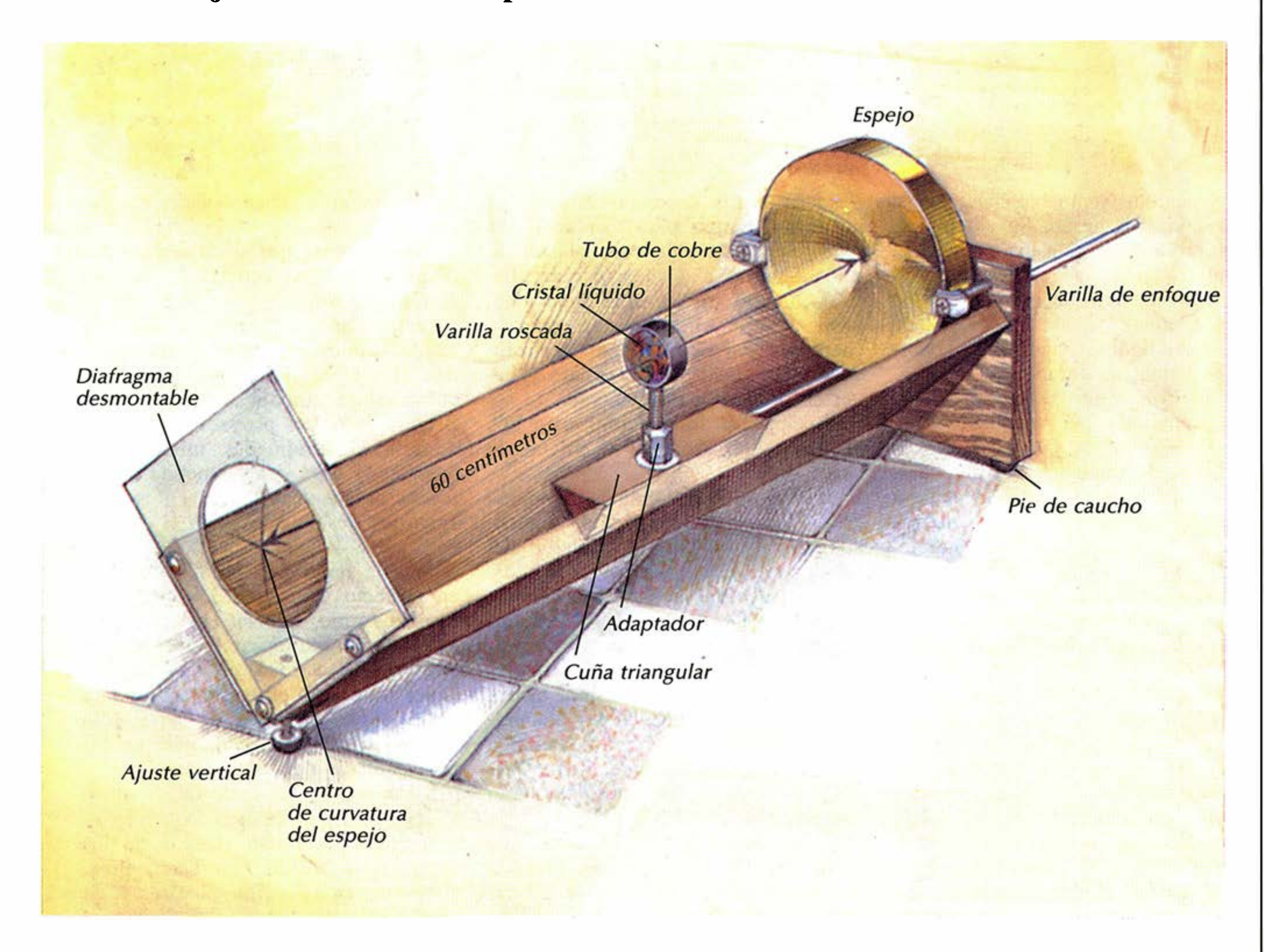
$$\frac{\text{distancia focal} \times \text{distancia objeto}}{\text{distancia objeto} - \text{distancia focal}}$$

O sea, un espejo de 30 cm de distancia focal enfocaría un objeto situado a 90 cm en un punto situado a 45 cm delante del espejo.

Calculé luego el aumento del espejo: igual a la distancia imagen dividida por la distancia objeto. Cuando ésta es de 90 cm y la distancia imagen es de 45 cm, el aumento es de 0,5; es decir, la imagen será un 50 por ciento más pequeña que el objeto. La imagen se formará invertida.

Las seis láminas de cristal líquido medían 15 cm de ancho por 30 cm de largo y un espesor de 0,2 mm. Cada una era sensible a un intervalo de temperatura diferente (desde 20 a 25 grados centígrados por abajo hasta 40 a 45 grados centígrados por arriba). Las láminas sensibles a las bajas temperaturas trabajan mejor en

Infrarrojo en el cuarto de la plancha



los recintos fríos, mientras que las sensibles a las temperaturas más altas son adecuadas para ambientes cálidos. Las láminas de cristal líquido están hechas de mylar revestido de dos capas de tinta. La capa interna es tinta de cristal líquido y la externa es tinta negra.

Construí el soporte (*véase figura*) de modo que la radiación infrarroja se reflejara desde el espejo para iluminar directamente la tinta del cristal líquido, y los resultados eran mucho mejores si dirigía la radiación sobre la superficie negra del cristal líquido. La tinta negra absorbe la energía infrarroja y calienta la tinta del cristal líquido. Esta, al calentarse, cambia de color. Para ensayar mi aparato, probé con una tetera caliente, una lámpara incandescente de 250 watts, las resistencias de un hornillo eléctrico y una linterna muy potente.

Descubrí que el foco infrarrojo ideal para mis experimentos era una plancha de vapor. La temperatura de ésta podía fijarla con bastante precisión entre los 50 y los 250 grados centígrados. Había otra razón por la que la plancha resultaba un buen foco, y es que tenía el fondo de teflón y éste, cuando se calienta, emite enseguida radiación infrarroja. Presentaba algunos inconvenientes. Cuando mantenía inclinada la plancha un rato, se apagaba automáticamente y algunas de las otras funciones no actuaban en absoluto. A una distancia de tres metros y medio, el cristal líquido mostraba una imagen nítida de dos centímetros de altura.

Me propuse averiguar el poder separador de la cámara. elante de la plancha puse una espátula de plástico de cuatro ranuras, de cuatro milímetros de ancho cada una. Pensaba yo que la espátula obstaculizaría parte de la radiación infrarroja, formando así una imagen compuesta de varias barras. Era necesario enfocar la imagen con precisión. Para ello iluminé la espátula por detrás con una linterna. Observé la luz visible de la misma en la cara oscura del cristal líquido. Enfoqué la imagen de modo que pudiera ver nítidamente la sombra de la espátula.

Tras cambiar la linterna por la plancha de vapor, delante de la cámara puse un cartón para bloquear la radiación infrarroja. Luego calenté el cristal líquido con la linterna y lo dejé enfriar. El cristal líquido presenta su máxima sensibilidad en el momento en que se torna negro. Por consiguiente, en ese instante retiraba el cartón y durante uno o dos segundos podía ver la sombra de la espátula.

Para grabar las imágenes que se creaban en el cristal líquido utilicé una cámara convencional. Encontré alguna dificultad para acercar la lente de ésta al cristal líquido; para obviarla, monté en el chasis un espejo, de modo que la imagen formada en el cristal líquido pudiese verse desde el costado del aparato. Esto me permitía colocar la cámara a una distancia de varios centímetros de la imagen. (onald G. Mooney.)

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Veinte mil leguas de viaje sub...tumbado

El capitán Nemo hallábase en su lujoso despacho. Su amplio escritorio descansaba sobre una alfombra persa de gran valor. Del mamparo pendía un mural firmado por Da Vinci. Veíase un piano de cola, atornillado al suelo para soportar los bandazos durante las tormentas. El sol, tras rielar sobre las aguas, penetraba por un ojo de buey y trazaba sobre la pared un dibujo de ondículas mudables y relajantes. Un camarero penetró en la sala a través de una escotilla de dos metros y medio de alta por sesenta centímetros de ancha, sobre la que una Venus de Botticelli emergía de las aguas, tallada en el forro de roble.

"¡Mi capitán! ¡Es hora de evacuar!"

"Pero... ¡si acabo de tomar el desayuno!"

"Perdone, mi capitán. El maestro de ribera dice que la construcción está rematada y que estamos listos para la botadura. Por su seguridad, señor, debe usted salir de la nave."

"¡Ah, eso! ¡Que forme la tripulación!", ordenó Nemo, poniéndose en pie. Pronto estuvo la playa pautada con las hileras de marineros, maquinistas, cocineros y oficiales. Nemo leyó perplejo el nombre repintado en la proa de su nave. ¿Sería *Nauta iluso* la grafía correcta? Bueno, ya no había tiempo para cambios. Accionó una gran palanca y el submarino comenzó a deslizarse rada abajo, cobrando más y más velocidad, hasta hendir el agua con enorme chapoteo. El barco continuó deslizándose agua adentro, cabeceando y balanceándose majestuosamente.

"Reciba mi felicitación, capitán", le deseó Ted Apique, el oficial de navegación.

"Al fin veo cumplida la ambición de mi vida", declaró Nemo, siguiendo con la mirada la progresión del submarino hacia el interior de la rada. "Por así decirlo, he hundido en esta empresa toda mi fortuna", añadió, con palabras poco felices por lo premonitorias. "¡Observe qué bien flota!" Nemo, en su entusiasmo, asió a su compañero por el cuello del uniforme. "Y pronto veremos también lo bien que se sumerge, señor oficial, en cuanto hayamos inundado sus tanques. ¡Subamos a bordo!"

Nemo llamó a una chalupa, que les transportó al submarino. Trepó a bordo, con Ted a sus talones. El capitán se encaminó a la escotilla principal. El *Nautilus* se escoró un poco y enseguida volcó airosamente, quedando con la quilla al aire, como una *Victoria* cualquiera. Ted y Nemo se encontraron chapoteando en las aguas.

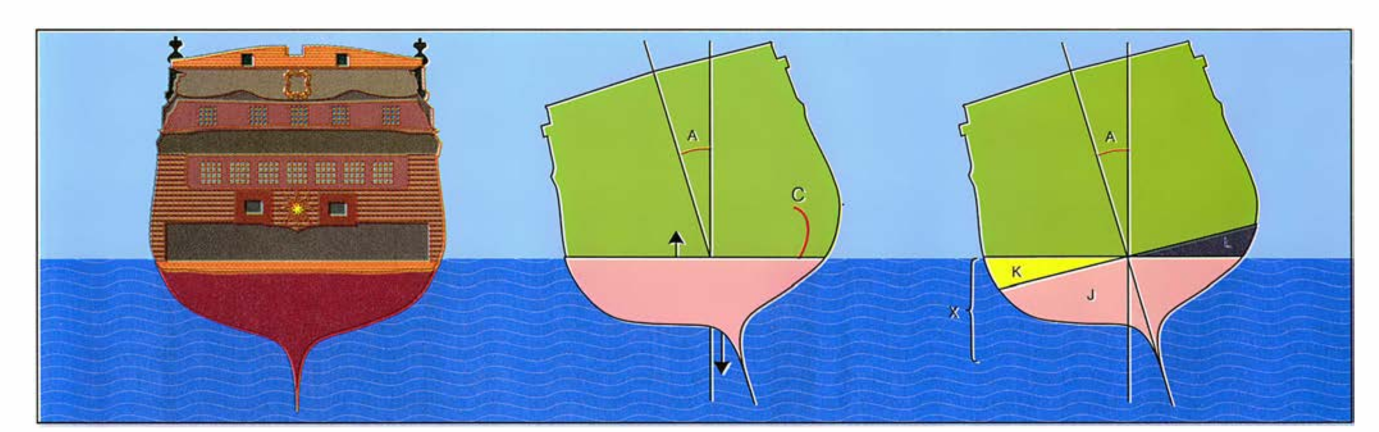
"Voy a tener que decirle unas palabritas a los proyectistas...", farfulló el Capitán Nemo.

...Los planos del proyecto del casco del *Nautilus* cubrían desparramados el tablero de diseño. "Todo es cuestión de empuje", explicó Jerry Bilder, jefe de proyectos. "Como descubrió Arquímedes mientras se bañaba, la nave está sometida a una fuerza ascensional igual al peso del agua que desaloja. Cuando el empuje es igual a la fuerza hacia abajo debida a la masa del barco, éste flota en perfecto equilibrio. Le garantizo, capitán Nemo, que en este concepto nuestros cálculos son precisos y exactos. La verdad es que, de no haber sido así, el barco se hubiera ido a pique, en lugar de sufrir sólo un vuelco de importancia que podríamos calificar de... secundaria."

Bilder sonrió, satisfecho de sí; volvió a dejar sobre el tablero los legajos.

A Nemo le salían chispas de los ojos. "Oiga, Bilder, mi barco flota, sí, pero con la quilla al aire, y de nada sirve en esa posición. Y eso no es cuestión de poca monta."

"¡Ay, ay, ay! ¡Si pudiera usted entenderlo desde mi punto de vista! Hemos medido el desplazamiento del



1. Centro de empuje P(A) *de un navío, correspondiente a un ángulo de escora* A *y curva de empuje* C*; la curva de empuje es el lugar geométrico del centro de gravedad (el centro de empuje* P(A) *de la porción sumergida), de área* X *determinada. Veamos de probar que, de todas las rectas que delimitan un área* X *constante, la que determina el centro de gravedad más bajo es la horizontal. Para la posición horizontal, el área* X *es igual a* J + K*, para otra orientación es* J + L*; comparemos los centros de gravedad correspondientes. Las áreas de* K *y* L *son iguales, pero el centro de gravedad de* L *está más alto que el de* K*, luego al sustituir* K *por* L *el centro de gravedad se eleva. Como el centro de gravedad más bajo corresponde a la horizontal, la tangente a la curva de empuje en* P(A) *es horizontal.*

barco y coincide con nuestros cálculos con precisión de un milímetro.”

“Entonces es que, al construirlo, han puesto ustedes demasiado peso en lo alto”, afirmó Nemo.

“¡No, no! Tuvimos buen cuidado de colocar el suficiente lastre para garantizar que el centro de gravedad de la nave quedase por debajo de la línea de flotación.”

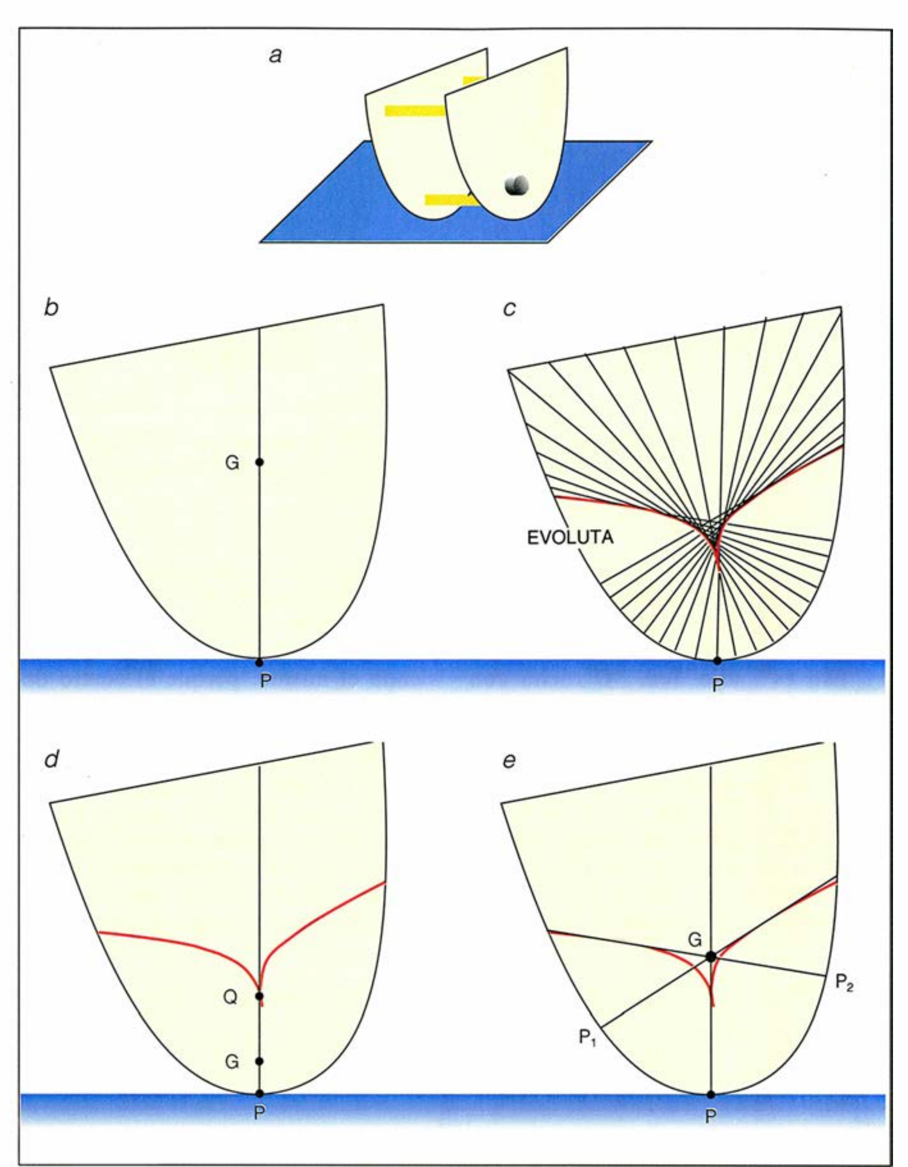
“Bueno, es seguro que ahora lo está”, rezongó Nemo cáusticamente. “Y también lo está la superestructura. Ni siquiera puedo entrar sin escafandra de buzo.”

Ted, mientras tanto, había estado esbozando unos diagramas en un papel. Reclamó la atención de Nemo con unos golpecitos en el hombro. “Me parece que he hallado la solución, mi capitán.” Se volvió hacia el proyectista. “Vamos a ver, usted afirma que la condición de flotabilidad estable es que el centro de gravedad se halle por debajo de la línea de flotación, ¿no es así?”

“¡Pues claro! El barco se balancea como si colgase de la línea de flotación; por tanto, si nos aseguramos de que su centro de gravedad quede por debajo del centro de oscilación, no habrá razón para que vuelque.”

“Muy plausible”, repuso Ted. “Y también muy erróneo. El barco no está en absoluto suspendido de la línea de flotación. Y lo que es peor, es que ‘el centro de giro’ se desplaza al escorar el barco”. Ted señaló a su dibujo. El peso del barco se aplica verticalmente hacia abajo en su centro de masa G. La fuerza de empuje actúa verticalmente hacia arriba y se aplica en el centro de empuje $P(A)$, que es el baricentro geométrico de la porción sumergida, esto es, el punto donde se encontraría el centro de masa si fuese uniforme en todo su volumen la densidad de esta porción sumergida, como el agua por ella desalojada. Incidentalmente, estoy utilizando un área para representar la masa porque el dibujo es bidimensional. Al ir cambiando el ángulo A, el centro de empuje $P(A)$ describe una curva, que denomino curva de empuje, C. Además, puedo demostrar que cuando el navío se escora un ángulo A, la tangente a la curva de empuje en el correspondiente punto $P(A)$ es horizontal. Dicho de otro modo, el barco se comporta exactamente como si la curva de empuje fuese rígida y rodase sobre una línea recta horizontal.

“Por lo tanto, nos es preciso comprender la dinámica de una curva en rodadura”, declaró Nemo. “Después podremos aplicar esa teoría para comprender la dinámica de mi nave.”



2. Perfil de un rodillo de cartulina e imanes, cuyo centro de masa G coincide con la ubicación de un imán (a). En el equilibrio, el centro de masa G se encuentra sobre la semirrecta vertical ascendente que parte del punto de contacto P (b). Las normales al perfil son todas tangentes a la evoluta del mismo (c). Si G se halla por debajo de la evoluta, existe una sola normal que pase por G y sólo hay una posición de equilibrio (d). Si G se encuentra por encima de la evoluta hay tres normales que pasan por él (e); el equilibrio en P es inestable.

“¡Exactamente!”, exclamó Ted. “Quisiera intentar un experimento, si me lo permiten. He recortado en cartulina un perfil rodante. Casualmente se parece a una parábola, pero eso no reviste especial importancia. He dibujado algunas líneas, que explicaré enseguida. Y tengo también dos imanes pequeños y pesados; en cuanto los coloque uno por cada lado de la cartulina, de forma que se mantengan uno al otro en su lugar, serán ellos quienes realmente determinen la ubicación G del centro de gravedad del conjunto.”

“Humm... No acabo de comprenderlo del todo”, dijo Nemo.

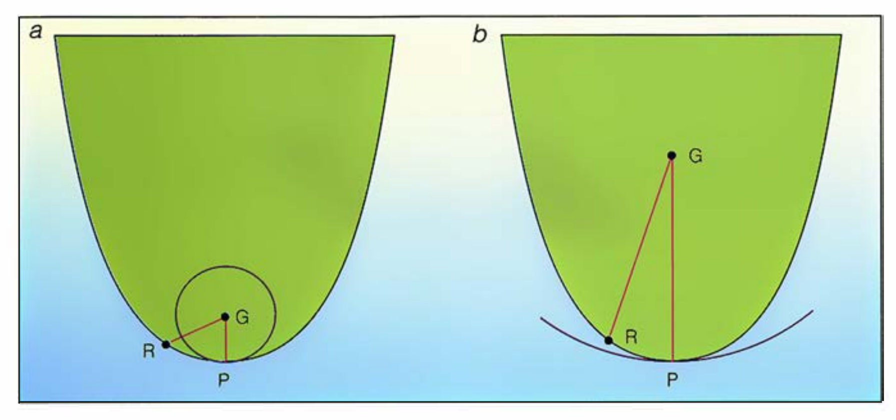
“¿Por qué?”

“Porque la cartulina es tan ligera que su masa es despreciable frente a la de los imanes.”

“¡Ah, ya veo!”

“Si coloco los imanes cerca del borde de rodadura, el conjunto gira hasta quedar en equilibrio. ¿Qué relación existe entre la posición G del imán y el punto en que el sistema rodante hace contacto con el suelo?”

“Bueno, vamos a ver”, dijo Nemo. “En el punto de contacto, la fuerza hacia abajo ejercida por la masa debe oponerse exactamente a la reacción hacia arriba... ¡Ya está! Si



3. (a) P *es punto de equilibrio estable, porque* GP *es menor que* GR *para todo punto cercano.* (b) P *es punto de equilibrio inestable, porque* GP *es mayor que* GR *para todo punto próximo.*

trazo por el punto *P* una perpendicular al perfil de rodadura, esta recta ha de pasar por el centro de gravedad *G*."

"Eso es", dijo Ted. "O dicho con otras palabras: un punto de contacto que determine el equilibrio para un centro de gravedad dado *G* es el pie *P* de la perpendicular al perfil de rodadura trazada por *G*. Y lo dicho vale para rodillos de forma arbitraria, no sólo para las parábolas, claro está. Valgámonos de *P* para definir la posición de equilibrio. Ahora, si yo desplazo *G* verticalmente hacia arriba, ¿qué sucederá?"

"El rodillo oscilará un poquito, pero el punto de contacto seguirá siendo el mismo, porque el centro de gravedad sigue hallándose en la perpendicular... ¡Ahí va! ¡Ahora se ha volcado del otro lado!"

"Sí. Y según su razonamiento, la perpendicular desde el nuevo punto de contacto *P*' también pasa por *G*."

Nemo estuvo reflexionando sobre aquello. "¿Quiere decir que en general puede haber varias perpendiculares a la curva que pasen por un punto dado?"

"Así es. Cada una de esas normales determina una posición de equilibrio del rodillo. Sin embargo, como descubrimos al subir a bordo del *Nautilus*, no se trata tanto de una cuestión de equilibrio cuanto de estabilidad. Al perturbar un rodillo (o un barco) que se encuentre en equilibrio estable, se bamboleará un poquito y retornará a su posición anterior; en cambio, si el equilibrio es inestable, se moverá a una posición completamente diferente. Necesitamos averiguar las condiciones de estabilidad del equilibrio de un rodillo. A tal fin, permítame que le muestre una cosa. Supongamos que dibujo muchas perpendiculares al rodillo. ¿Qué observa usted?"

"Parecer envolver una curva", dijo Nemo. Bilder se puso a recoger aparatosamente sus planos y diseños, pero Nemo no le prestó la menor atención.

"Esa curva es la evoluta del rodillo; una curva que es tangente a todas las perpendiculares a aquél", prosiguió Ted. "Sé todas esas cosas porque en Náutica nos enseñan geometría", añadió ufano.

Bilder rezongó. ¿Pues qué se piensa que nos enseñan a los ingenieros navales? "En este caso, la evoluta tiene un punto agudo, una cúspide. Solamente una de las perpendiculares pasa por puntos situados fuera de la evoluta, mientras que tres pasan por puntos de su interior. O sea, si *G* cae en el exterior de la evoluta existe una única posición de equilibrio *P*, a saber, el pie de la perpendicular correspondiente. Basta girar el rodillo hasta que *P* se encuentre en contacto con el suelo. Pero en el caso de puntos situados dentro de la evoluta, las posiciones de equilibrio son tres, *P*, P_1 y P_2. Ahora bien, ¿en qué casos es estable una tal posición de equilibrio?" (El desarrollo gráfico aparece en la figura 2.)

El capitán Nemo se rascó la cabeza, perplejo.

"Bueno, la masa 'quiere' estar lo más baja posible, por lo que, al apartar el rodillo de una posición estable, el centro de gravedad debería elevarse y forzaría luego al rodillo a retornar a su posición primera; en cambio, en una posición de equilibrio inestable, el centro de gravedad debería descender."

"En efecto. Los equilibrios estables corresponden a mínimos locales de la energía potencial, mientras que los inestables son máximos locales. Por tanto, en un equilibrio estable, *P* tendría que ser el punto de la parábola que menos distase de *G*, mien-

4. Elementos geométricos que determinan la estabilidad del equilibrio de un navío.

tras que en un equilibrio inestable debería hallarse a distancia máxima. Entiéndase: distancia máxima o mínima comparada con la de puntos de la parábola próximos a *P*; la noción de estabilidad concierne a perturbaciones pequeñas. (*Véase la figura 3.*)

"Volviendo a la figura 2, podemos observar que un punto de equilibrio es estable si, cuando el rodillo es inclinado hasta esa posición, *G* se encuentra por debajo del punto *Q*, donde la perpendicular interseca a la evoluta. O sea, si el centro de gravedad *G* se encuentra entre *P* y *Q*; en caso contrario la posición es inestable. Por consiguiente, cuando hay tres equilibrios, el mediano, *P*, es inestable, mientras que P_1 y P_2 son estables. Esa ha sido la razón de que el perfil quedase tumbado: el equilibrio en *P* se tornó inestable y el perfil rodó hasta P_1."

"Así pues, los cambios bruscos de la estabilidad, e incluso la existencia de un equilibrio —con capacidad para provocar el vuelco del rodillo— ¿solamente pueden darse cuando *G* pasa a través de la evoluta?", quiso saber Nemo.

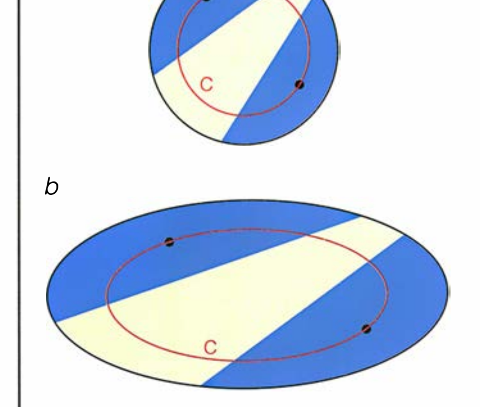
Ted asintió vivazmente con la cabeza. Jerry interpuso un comentario acerado. "Todo eso es muy bonito, pero ¿qué tiene que ver con los barcos?"

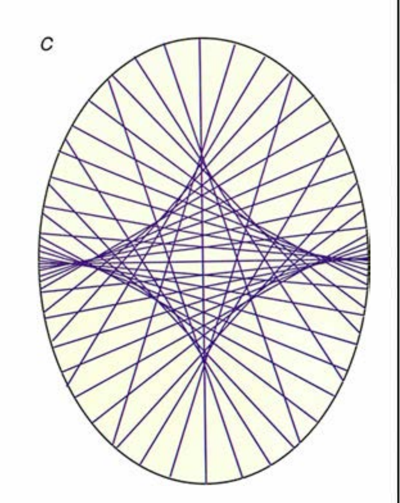
"Las cosas ocurren exactamente de la misma forma, aunque en lugar del perfil del rodillo se utiliza la curva de empuje *C* de la nave. Su evoluta es conocida por curva metacéntrica *M*. Cuando la nave escora, inclinándose un ángulo *A*, el punto *M*(*A*) donde la normal a *C* trazada por *P*(*A*) entra en contacto con la curva metacéntrica *M* se denomina metacentro correspondiente al ángulo *A*. Esta inclinación de ángulo *A* define un equilibrio si *G* yace sobre la recta que une a *P*(*A*) con *M*(*A*). El equilibrio será estable si *G* y *P*(*A*) se encuentran en el mismo lado de *M*(*A*) e inestable si *M*(*A*) queda situado entre *G* y *P*(*A*)."

"¡Estupendo! ¿Y cómo se aplica todo esto al caso del *Nautilus*?", quiso saber Nemo.

"Vamos a ver... aunque el *Nautilus* tiene un aspecto un poco fantástico, su sección transversal es básicamente una elipse, por lo que su curva de empuje es una elipse semejante. La evoluta de una elipse es una curva muy bonita, con cuatro cúspides. Por consiguiente, la curva metacéntrica del *Nautilus* tiene cuatro cúspides. Al botar el barco esperábamos que el ángulo de inclinación fuese nulo. Ahora bien, la cuestión de si el equilibrio correspondiente a $A = 0$ es estable depende de que el centro de gravedad *G* se halle más bajo que el

Curva de empuje de un casco elíptico





Si el casco fuese circular, resulta obvio por la simetría que una recta que separe una porción de área fija produce un segmento circular de forma fija que se limita a rodar en torno al círculo, por lo que su centro de masa describe una circunferencia concéntrica. Es decir, la curva de empuje *C* de un círculo es una circunferencia concéntrica (*a*). Dilatemos el sistema de coordenadas en sentido horizontal; la deformación del círculo producirá una elipse. Las regiones de igual área se deforman en regiones de áreas iguales y los centros de masa se transforman en centros de masa: *C*, al deformarse, se transforma en una elipse semejante a la primera (*b*). Con vocabulario técnico, la curva de empuje constituye un invariante afín.

Desafortunadamente, la curva metacéntrica no es un invariante afín: en el caso de un círculo se reduce al punto central, mientras que en una elipse tiene cuatro cúspides (*c*). Así pues, el razonamiento anterior no es válido para la curva metacéntrica.

metacentro *M*(0) correspondiente, o sea, que la más alta de las cúspides de *M*."

"Pero eso tiene bastante de coincidencia, ¿verdad?", preguntó Nemo.

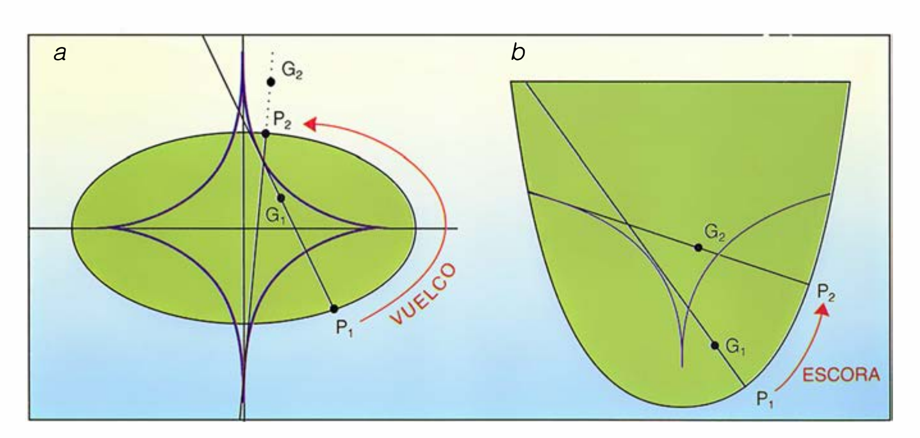
"No acabo de ver a qué se refiere."

"A que el ángulo que ha de interesarnos corresponda precisamente a una cúspide de *M*."

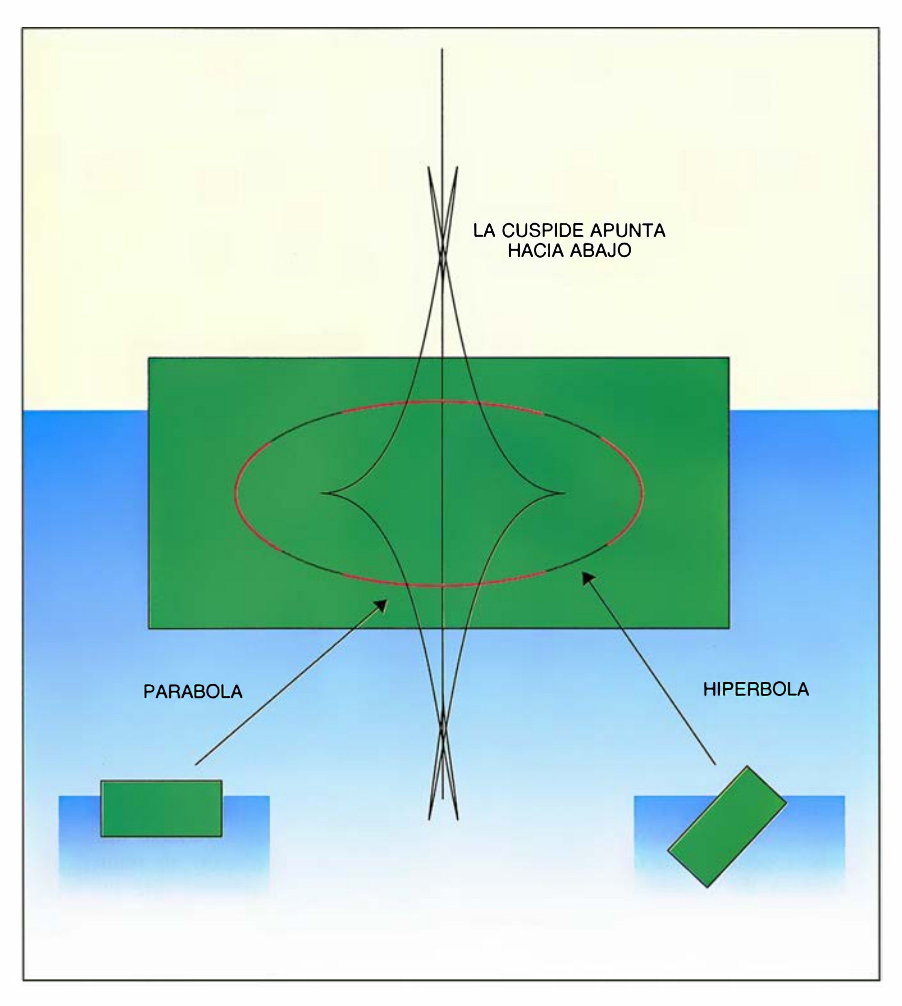
"¡Ah, ya! Eso es debido a que el casco tiene un eje de simetría. En los ejes de simetría siempre tendremos cúspides. Aunque también podemos encontrarlas en otros lugares, no crea. En general corresponden a máximos o mínimos de la curvatura de *C*."

"Vaya. No tienen nada que ver con la línea de flotación, ¿eh?" Nemo lanzó a Bilder una mirada furibunda.

"Si *M* fuera pequeño, *M*(0) podría encontrarse por debajo de la línea de flotación, con lo que el centro de gravedad podría encontrarse por de-



5. (a) Los puntos cuspidales orientados "hacia arriba" conducen a modificaciones bruscas del equilibrio, o sea, el vuelco. (b) Los orientados "hacia abajo" determinan cambios lentos del equilibrio, es decir, la nave se escora.



6. Curva metacéntrica de un casco de sección rectangular

bajo de la línea de flotación, pero por encima de $M(0)$, ocasionando un equilibrio inestable."

"Sí, pero...", dijo Bilder, revisando rápidamente las páginas de un cuaderno de notas "...pero la verdad es que el centro de gravedad del *Nautilus* se encuentra por debajo de $M(0)$."

"Y no obstante volcó", dijo Ted. "Me pregunto por qué... Vamos a ver. Supongamos que G se encuentre justo por debajo de $M(0)$ y que resulte desplazado hacia arriba. Entonces G atraviesa la curva metacéntrica M ¡y el equilibrio se torna inestable! Existe otro equilibrio estable, pero se halla muy alejado. La nave gira casi 180 grados sobre su eje y vuelca."

"Así que cuando subimos a la cubierta del *Nautilus* elevamos el centro de gravedad y el barco rodó sobre sí mismo."

"En efecto", dijo Ted. "Ello se debe a que la cúspide de M apunta hacia arriba. Si apuntase hacia abajo, todo cuanto sucedería es que la nave se escoraría un poquito; se inclinaría suavemente hacia un costado. Las cúspides de M 'aguzadas hacia arriba' son peligrosas y provocan el vuelco; las que apuntan hacia abajo son más seguras y sólo hacen que el barco se escore."

"Cuando dices 'arriba' y 'abajo' ¿es con respecto a la posición inclinada?", inquirió Nemo.

"Así es. Dado un ángulo cualquiera A, escoramos el barco hasta ese ángulo y miramos después la dirección de la cúspide. Con otras palabras, 'abajo' significa 'hacia P' y 'arriba' quiere decir 'alejándose de P'."

"Tal vez nos conviniera darle una sección diferente", aventuró Nemo. "¿Qué le parece una sección rectangular?"

"Bueno... es delicado." Ted desapareció durante hora y media; al cabo regresó con un manojo de folios. "La curva de empuje correspondiente a un casco de sección rectangular se asemeja bastante a una elipse, aunque en realidad consta de cuatro parábolas y cuatro hipérbolas, según como esté descansando el barco. La curva metacéntrica tiene nada menos que ocho cúspides en total. La situada en lo alto, sobre el eje de simetría vertical, es la determinante de estabilidad, y a diferencia de la correspondiente a la elipse, apunta hacia abajo. Así que el casco experimenta escora en lugar de vuelco."

En esta ocasión le correspondió a Nemo efectuar ciertos cálculos intrincados —de carácter financiero ahora. "¡Maldita sea...! Si no me hubiera lanzado con el Da Vinci... No hay nada que hacer. No puedo permitirme la construcción de otro barco. Habremos de contentarnos con modificar el existente." Su mirada lanzaba dardos a Bilder.

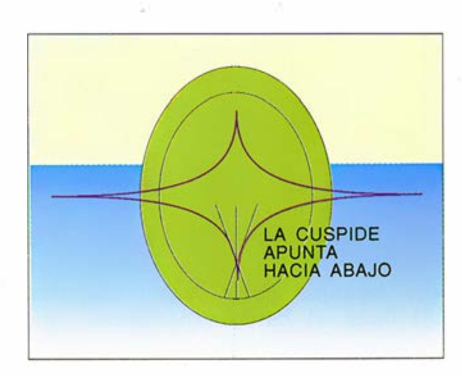
"Tal vez pudiéramos imprimirle una forma más rectangular a martillazos", comenzó a decir el proyectista.

"Señor, dudo muchísimo que eso sea factible", interrumpió Ted. "Pero sí hay una posibilidad. Haciendo girar la elipse 90 grados, la cúspide adecuada apunta hacia abajo, y ya no es posible que se produzca el vuelco."

Clavó la mirada en Bilder. "Tendrá que ajustar el lastre para que el *Nautilus* descanse sobre una de sus bandas."

... El Capitán Nemo ocupaba una poltrona en su lujosa cámara. Bajo su escritorio, un Da Vinci hacía las veces de felpudo. A su izquierda, un valioso tapiz persa pendía del mamparo. Del otro lado veíase un gran acordeón atornillado a la pared para evitar diera bandazos durante las tormentas. El ardiente sol tropical que caía a plomo por una claraboya del techo le hería en la cabeza. Un camarero abatió la hoja forrada en roble de una extraña escotilla, de dos metros y medio de ancha por sólo sesenta centímetros de alta, sobre la cual se reclinaba una Venus de Boticelli, inmersos los pies en una cascada. El camarero reptó al interior para llevarle el almuerzo.

"¡Ay, Dios mío!, pensó Nemo. Me parece que no voy a poder soportar así otras 19.999 leguas más."



7. ¿Una solución para los problemas de Nemo?

Libros

Ramón Margalef y Luis Alonso

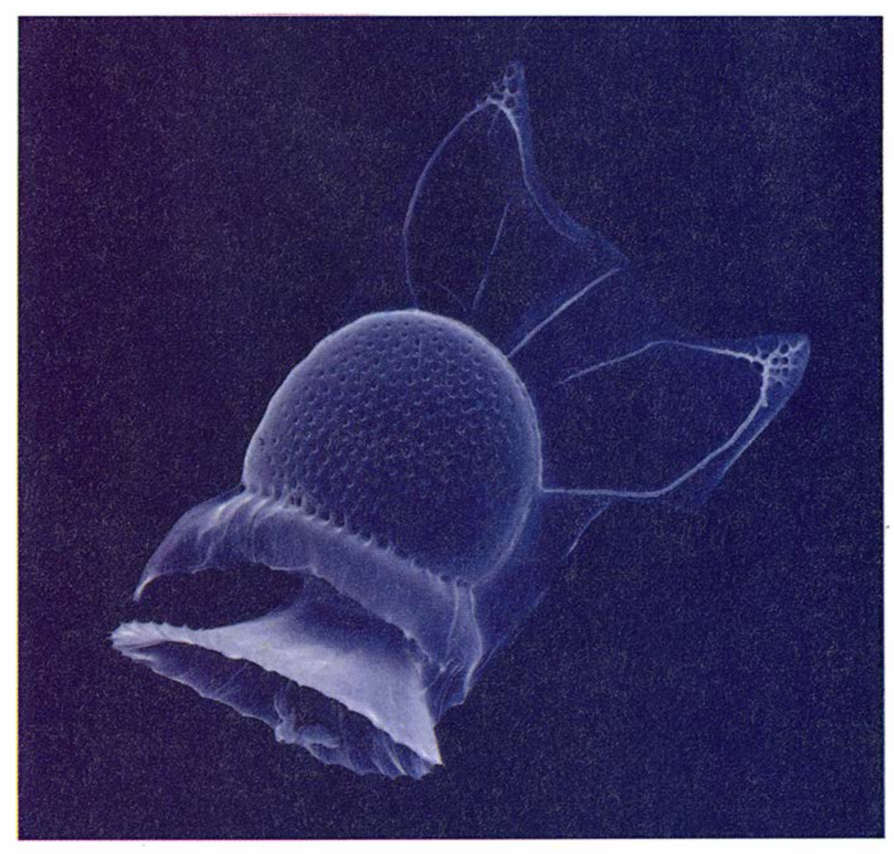
Ecología marina

Fitoplancton

Atlas de fitoplancton del mar Mediterráneo, por Maximino Delgado y José-Manuel Fortuño. *Scientia Marina*, 55 (supl. 1), páginas. 1-133. Instituto de Ciencias del Mar, Barcelona, 1991.

Este libro constituye un artículo de una revista de ciencia marina. Pero los editores han tenido el acierto de publicarlo además en tirada aparte, y en encuadernación rígida, a través del Instituto de Ciencias del Mar de Barcelona. No es una obra única; han aparecido varias, en diversos países, a lo largo de los últimos diez años, aprovechando todas las posibilidades técnicas del microscopio de barrido y de la asombrosa o fantástica variedad de formas de muchos organismos planctónicos, limitados, en nuestro libro, a los del plancton marino.

Se trata del primer atlas referido a nuestro Mediterráneo, si prescindimos del *Atlas du Phytoplancton Marin*, publicado por el CNRS francés, bajo la dirección de Alain Sournia, y que es una obra algo más extensa, más técnica y algo menos espectacular. El libro de Delgado y Fortuño entra por los ojos: es estimulante y útil tanto para el estudio como para la contemplación. Se le puede incluir en la categoría de los que los anglosajones llaman "coffee-table books". Las imágenes de todos estos organismos, frecuentemente a mil o más aumentos, son muy bellas, aunque hay que decir que, en su reproducción, las fotografías han perdido, en parte, el excelente contraste que habían conseguido las originales. Estas imágenes tienen un valor de documentos; estructuras de la cubierta de las células, por ejemplo, quedan expuestas con un detalle y realismo totales, de manera que ahí permanecen como testimonios de museo para resolución de problemas taxonómicos y para comprobación de nuevas interpretaciones que pudieran surgir.



Vista lateral de Ornithocercus magnificus *Stein.*

El atlas que comento contiene 96 láminas, cada una de ellas con cuatro imágenes. Por supuesto, no ofrecen un catálogo completo del plancton vegetal del Mediterráneo noroccidental. No puede ser éste su propósito, pues los ejemplares representados no proceden más que de un número muy limitado de muestras obtenidas entre Barcelona y Mallorca y en el golfo de León, entre 1982 y 1989. Las formas ilustradas incluyen 135 especies de dinofíceas, 80 diatomeas, 21 cocolitoforales y diversos organismos de otros grupos. Algunos dibujos sacados de otras obras complementan el "bestiario" o proporcionan detalles que contribuyen a hacer entender o interpretar mejor algunos aspectos anatómicos.

Los autores han sido sumamente parcos en su texto, aunque han llevado a cabo un trabajo inapreciable en la cuidadosa revisión de la nomenclatura. A veces los naturalistas somos descuidados o nos dejamos llevar por la costumbre o por preferencias individuales, olvidando que existe una reglamentación estricta. *Triadinium polyedricum*, *Proboscia alata*, etc., son nombres que pueden sonar un poco raros a los oídos de los viejos planctólogos, pero es cuestión de acostumbrarse.

Hojeando este libro uno no puede menos que recordar la serie de láminas publicadas por el naturalista alemán Ernst Heinrich Haeckel (1834-1919), difusor del darwinismo en el área cultural germánica e inventor de la bendita palabra ecología. Aquellas láminas aparecieron entre 1899 y 1904 (Verlag des Bibliographischen Instituts, Leipzig y Viena). Los dibujos publicados bajo la dirección y responsabilidad de Haeckel están, desde luego, un tanto arreglados en un sesgo fantástico y romántico y según un sentido muy personal de la simetría: uno no tiene más que comparar las imágenes verídicas de diatomeas y dinoflageladas del atlas de Delgado y Fortuño con las láminas 4 y 14 del atlas de Haeckel. En las figuras de Haeckel la naturaleza sirve de inspiración y se expresa de manera muy personal; hay un trabajo que tiene el valor de mensaje artístico. Se ha publicado recientemente

una obra que atribuye a las láminas de Haeckel la fuente de inspiración del "art nouveau" o "Jugendstil" del 1900 (C. Kockerbeck: *Ernst Haeckels "Kunstformen der Natur" und ihr Einfluss auf die deutsche bildende Kunst der Jahrhundertwende*, 1986).

En nuestro *Atlas* estamos ante un fenómeno muy diferente. La belleza de la naturaleza aparece sobria y elocuente en su misterio, y no tiene contacto con el arte si éste se entiende como exclusiva creación humana. Pero su contemplación nos resulta tanto o más inspiradora para los que descubrimos bellezas ilimitadas, no ya en un *Ceratium* o en un mosquito, sino también en la superficie de un simple guijarro. Sería interesante que a éste siguiera otro volumen que representara un muestrario amplio de los esqueletos de los mismos y de otros organismos, tal como aparecen en los sedimentos del Mediterráneo occidental, donde su distribución debe reflejar las desigualdades persistentes en la propensión de las diferentes especies a desarrollarse preferentemente en unas o en otras áreas. (R. M.)

Ciencia en imágenes

Del XIX al XX

ALBUM OF SCIENCE. THE PHYSICAL SCIENCES IN THE TWENTIETH CENTURY, dirigido por Owen Gingerich. Charles Scribner's Son; Nueva York, 1989. **ALBUM OF SCIENCE. THE BIOLOGICAL SCIENCES IN THE TWENTIEH CENTURY**, por Merriley Borell. Charles Scribner's Son; Nueva York, 1989. **ORCHIDS FROM THE BOTANICAL REGISTER 1815-1847**. Dirigido por Samuel Sprunger. Birkhäuser Verlag; Basilea, 1991. **ZOOLOGICAL RESEARCHES IN JAVA, AND THE NEIGHBOURING ISLANDS**, de Thomas Horsfield. Edición preparada por John Bastin. Oxford University Press; Oxford, 1990.

El documento gráfico, que reviste importancia decisiva en todas las áreas de la historia, adquiere un interés didáctico particular en la historia de la ciencia. Muchas monografías recientes, algunas sobresalientes, se han tejido en torno a una sucesión de pinturas, fotografías o gráficos, que introduce por los sentidos lo que la explicación nuda difícilmente puede mostrar. Con su tino habitual, Charles Scriber's Sons editó hace unos años una enciclopedia ilustrada de la ciencia, dirigida por I. Bernard Cohen, cuyos dos últimos volúmenes, dedicados al siglo XX, abren esta reseña, que cotejamos con sendas muestras, de calidad parangonable, de la ilustración en el XIX, una sobre botánica y la otra sobre zoología.

La fotografía separa emblemáticamente la ciencia de nuestra centuria de la descripción pincelada, más o menos fiel, de los naturalistas. Owen, y su equipo, así como Borell, han huido de la galería de retratos para sorprender al científico en su medio, en su laboratorio, en su pizarra o en el campo y la laguna. En ocasiones el protagonista es el instrumento —un ciclotrón, un microscopio electrónico, el *Alvin*—, el grupo —asistentes a las conferencias Solvay, o los citogenéticos del maíz de Cornell—, anotaciones personales manuscritas, páginas de artículos, viñetas cómicas. Se intenta, en efecto, imbricar la ciencia en la sociedad de nuestro tiempo. El lector reconocerá de inmediato muchas ilustraciones, tomadas de esta revista.

De manera pormenorizada, *The Physical Sciences in the Twentieth Century* se articula en ocho partes y veinticuatro capítulos, de autoría plural, aunque el grueso lo ha redactado el propio Owen. Se sigue un orden temático y, dentro de éste, el cronológico. Se cubren así los cimientos (Rutherford, Einstein y Bohr), la cosmología, geología, átomo, estructura de la materia, electrónica y computadores, exploración del espacio y transformación de las relaciones del científico con la sociedad.

Precede a cada capítulo un resumen introductorio. Sea, al azar, el duodécimo, sobre física del núcleo. Stephen G. Brush se centra en el año 1932, famoso por haberse descubierto el positrón, identificado el neutrón y postulado el neutrino. Para ubicar al primero, pone en escena el esfuerzo de Dirac por compatibilizar la mecánica cuántica con la relatividad einsteiniana a través de la función de onda del electrón. Enmarca el trabajo de Chadwick sobre el neutrón en el contexto de las primeras teorías del núcleo. Por último, el neutrino, así llamado por Fermi, insta el desarrollo de la desintegración beta y la búsqueda de fuerzas fundamentales, con el empeño técnico subsecuente, asociado a la fisión.

Si de la introducción de un capítulo pasamos al desarrollo del mismo, sea ahora del 10, por ejemplo, consagrado a la deriva continental, encontraremos, con un preciso pie explicativo, fotografías del suelo oceánico, de la falla de San Andrés, de un sismógrafo, de una erupción volcánica, nacimiento de una isla, de vistas de satélite o de recreaciones de Gondwana.

El mismo patrón se repite en *The Biological Sciences in the Twentieth Century*, aunque aquí sea Borell autora única. Así, divide la obra en siete partes y veintisiete capítulos, con una presentación de Cohen y una sumaria indicación bibliográfica comentada al final, donde, barriendo *pro domo nostra*, escribe: "Los lectores interesados en seguir la evolución de las cuestiones biológicas en el siglo XX no deberían pasar por alto los *Libros de Investigación y Ciencia*".

El esqueleto que presta soporte al álbum de la vida tiene, podríamos decir, cráneo ("el nuevo siglo" y "el método experimental", títulos de las dos primeras partes que resumen el estado de la biología en los albores del siglo, la creación de centros y los nuevos instrumentos, materiales y teóricos), vértebras y cinturas ("transformación de la historia natural", "procesos vitales" y "el animal humano", que pasan revista a la configuración de las disciplinas biológicas ya autónomas, a los conceptos fundamentales de la teoría y, por último, a la antropología y etología) y extremidades ("biología en beneficio de la sociedad" y "naturaleza del organismo", esta última, pese al título, no se solapa con lo expuesto más arriba, sino que aborda el lenguaje de la biología y nuestro puesto en la naturaleza).

Tomemos aquí también, sin mayor criterio que el de la coincidencia numérica, el capítulo 12, sobre la estructura, cuya pieza fundamental es la célula. De ésta trata. Va ligada al desarrollo del microscopio, y conoce fases sucesivas de esplendor cuando en los años treinta se introduce el electrónico, más tarde el de transmisión y luego el de barrido. En el álbum familiar de la célula se nos presentan seres unicelulares, mitosis, micrografías, ápices de células vegetales, eritrocitos, leucocitos y plásmidos, entre otros.

La tradición pictográfica en historia natural, tan vieja como el hombre, tuvo dos siglos de oro, el XVIII y el XIX. La primera mitad de este último debe su fama al *Botanical Register*, fundado en 1815 por Sydenham Teast Edwards y cerrado treinta años más tarde. En ese período publicó 33 volúmenes con unas 2700 láminas. Samuel Sprunger ofrece en *Orchids from the Botanical Register 1815-1847* casi medio millar, las relativas a dicha familia, en dos volúmenes, el de las ilustraciones y el de las descripciones.



Oncidium harrisonianum Lindl.

En una época en que la historia natural pertenecía tanto los profesionales como a los aficionados, quizás a éstos más, las orquídeas se convirtieron en objeto de cultivo, búsqueda y estudio incesante. (Fue uno de los temas que absorbieron a Darwin.) Su sistematización, sin embargo, va unida al nombre de John Lidley (1799-1865).

De la vida y obra de Lindley, y del estado de la botánica en su tiempo, nos da William T. Stearn una de esas estampas ya clásicas en su haber. (Ha escrito sobre Turner, Ray, Linneo y cien más lo que hoy se cita y pasarán años en enmendarlo.) Gozó Lindley de la fortuna de entrar de mozuelo en la casa de Banks, que guardaba el herbario más completo y la mejor biblioteca del Reino Unido. Trabaja sobre las rosáceas, depura géneros y escribe distintas memorias, al tiempo que experimenta y dirige jardines institucionales; si maestro en la taxonomía exacta y puntilloso en las definiciones, carece del vigor mental de otros contemporáneos, a pesar de redactar un manual para sus alumnos de la Universidad de Londres que se traducirá al alemán y al italiano y servirá de inspiración al tratado de Achiles Richard, del que los españoles del siglo pasado bebieron sin tasa.

Pero la obra de su vida fueron las orquídeas, sus géneros y sus especies, en su mayoría aceptados todavía. Basta asomarse a la revista *Lindleyana* para comprobar hasta qué punto siguen vigentes sus descripciones, que el lector hallará reproducidas en el segundo volumen. Este y las láminas del primero, con los trabajos sistemáticos e históricos que les acompañan, hacen de la obra un producto admirable, y como decía el anónimo autor de *Sobre lo sublime* (del 40 d.C.): "La admiración, combinada con la sorpresa, queda invariablemente muy por encima de lo que simplemente busca convencer y deleitar."

Thomas Horsfield (1773-1859) fue el primer naturalista norteamericano de Indonesia, siguiendo una tradición que habían abierto jesuitas, dominicos y agustinos españoles, cuya memoria tibiamente empezó a rescatarse (por Madrid Moreno) hace sesenta años, y que ahora esperan otros aires para su vindicación. Horsfield desarrolló también una importante labor médica, razón postrera de su dedicación a la investigación de las plantas curativas de Java, que por extensión le llevaron al estudio de insectos, vertebrados y minerales.

Bastin recorre su *iter javanicum*, año tras año, tejiendo el contexto en que acontecen sus descubrimientos, sus libros, su correspondencia, su olvido en Europa. El fin práctico y social de su inquisición: "El progreso que hasta ahora he realizado me ha animado a ahondar en mis primeros ensayos y ha dado una nueva orientación a mi búsqueda... las opiniones de un comienzo se han matizado con los hallazgos... y he evolucionado hasta proyectar un plan descriptivo general de los especímenes vegetales de la Isla desde un enfoque médico y económico." Esa idea globalizadora abarca el conocimiento del clima, el relieve, los cursos de los ríos, las posibilidades de mejores comunicaciones intra e interinsulares.

Para ilustrar sus *Zoological Researches in Java, and the Neighbouring Islands* se ayudó de William Daniel, obra que completaron William Taylor, Joseph Hullmandel, Auguste Pelletier y John Curtis. Las descripciones no se limitan a la escueta reseña de caracteres al uso, linneana. Señala la presencia o ausencia de rasgos vestigiales. Influido por Cuvier, expone la coherencia morfológica general. Da las medidas de las dimensiones, el hábitat, su canto, su modo de vida (anidamiento, alimentación), sus costumbres sociales y compartición del medio con determinadas especies. (L. A.)

Genética molecular

Puntos de partida

THE EXPANSION OF AMERICAN BIOLOGY. Dirigido por Keith R. Benson, Jane Maienschein y Ronald Rainger. Rutgers University Press; New Brunswick, 1991. **CHEMICAL EVOLUTION**, por Stephen F. Mason. Clarendon Press; Oxford, 1991. **A HISTORY OF EXPERIMENTAL VIROLOGY**, por Alfred Grafe. Springer-Verlag; Berlín, 1991. **THE EMERGENCE OF BACTERIAL GENETICS**, por Thomas D. Brock. Cold Spring Harbor Laboratory Press, 1990.

Estas cuatro obras convergen, desde puntos de arranque distintos y como un morir natural, en la genética. La última es la historia de esa disciplina reciente. Sin embargo, cada una tiene su propia especificidad, su autonomía, que dicen los epistemólogos.

The Expansion of American Biology constituye la continuación de la obra, ya reseñada en estas páginas, *The American Development of Biology*, con las que se intenta recoger la evolución de las ciencias de la vida en los Estados Unidos, proceso que epitomiza, en buena medida, su curso en todo el mundo.

Esta segunda parte arranca, pues, de los años veinte, momento en que, en citología, primer capítulo abordado, se opera un cambio de rumbo. Para explicar ese movimiento de agujas, Jane Maienschein toma como ejemplo la redacción simultánea, en 1924, de tres obras significativas: la segunda edición de *An Introduction to the Study of Cytology,* de Leonard Doncaster, *General Cytology*, dirigida por Edmund V. Cowdry, y la revisión de *The Cell*, de Edmund Beecher Wilson. Doncaster expone su manual de acuerdo con un esquema clásico ya entonces, en el que se ocupa de la definición de célula, orgánulos de la misma, división, centrosoma, células germinales, fecundación, partenogénesis, determinación del sexo, cromosomas y herencia. La obra de Cowdry es, en primer lugar, colectiva, expresión de una especialización acreditada con disparidad de datos, métodos y enfoques, y, en segundo lugar, abierta a cuestiones de física y química celular apenas esbozadas hasta entonces. Wilson pertenece también al pasado en su libro enciclopédico y en su planteamiento morfológico con la organización como elemento central de la interpretación de la célula. (España vivió el primer tercio del siglo atenta a la citología alemana, traída por el jesuita gerundense Jaime Pujiula. Todavía en 1943 las *Lecciones de Citología y Embriología General*, de Diego Ferrer, se dividían en concepto de la célula, estructura de la célula, el núcleo, la división, cromosomas y mitosis, es decir, lo que, con las obligadas modificaciones del desarrollo de la investigación morfológica, venían articulando los manuales hispanos desde el texto benemérito de Apolinar Federico Gredilla, a comienzos de siglo.)

Más representativo que importante, sin ser éste menor, fue el papel de Nettie Maria Stevens y Alice Middleton Boring. Su valor simbólico reside en lo que suponen de acceso de la mujer al campo de la investigación, aquí descrito con distancia suficiente para que resulte más contrastante en su comparación con el hombre. Ambas solteras, ambas discípulas de Morgan, ambas demostrando a cada momento su valía, no siempre reconocida, como cuando Stevens establece en 1905 que los cromosomas eran los responsables de la herencia o determinación del sexo; la muerte le llegó cuando se le acababa de conceder su primer puesto remunerado, tras haberse pagado toda su investigación con su escaso patrimonio. Boring sacrificó su interés citogenético en fundar las bases de una biología científica en China. (Más anecdótica fue la incorporación de la mujer española a la ciencia, aun cuando tuviéramos incluso un siglo antes alguna figura, como María Antonia Gutiérrez Bueno, autora de una *Memoria sobre la fabricación de la sal amoníaco*, donde deja entrever su desenvolvimiento en el laboratorio real de Madrid, dirigido por su padre.)

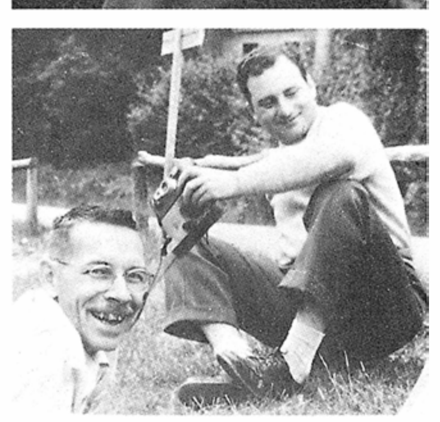
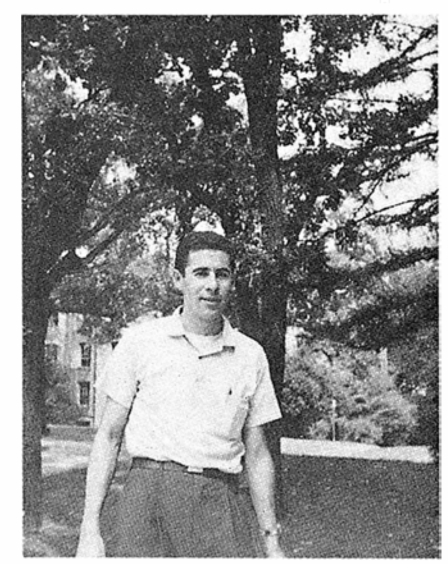
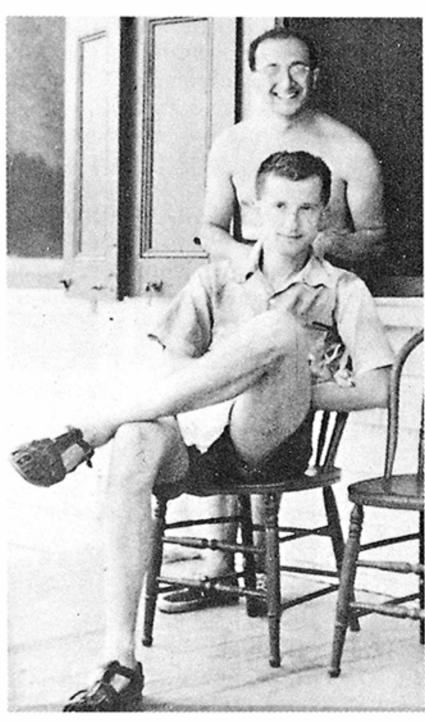
Figura señera de la paleontología americana del segundo tercio del siglo fue George G. Simpson, quien establece el puente entre la geología (donde estaba confinada) y la biología (su nuevo lugar de asentamiento, más pertinente). La eleva, además, a la categoría de ciencia, con sus propios métodos y con inyección del aparato criteriológico necesario para dotarla de potencia suficiente. La abre a campos inéditos, el de la ecología y diversidad geográfica, y más que reconstruir organismos pretéritos recrea ambientes extinguidos con la identificación de las relaciones entre plantas y animales o animales entre sí. Dentro del dominio de los principios por los que ha de guiarse, determina el ritmo y el modo de evolución de los individuos y las comunidades, apuntalando así el neodarwinismo, del que es él uno de los pilares fundadores con su tesis sobre el tránsito de la microevolución a la macroevolución y su aceptación del concepto poblacional de especie. (Simpson ejerció una decisiva influencia en la paleontología española, de modo muy particular en el núcleo barcelonés de Crusafont y su extensión ovetense de Truyols.)

La embriología y las ciencias de la reproducción del período de entreguerras se van desgajando paulatinamente de la genética, de la agricultura, de la fisiología y de la ginecología. Es el momento de los experimentos de Frank Lillie en la Universidad de Chicago, en los que demuestra que la ternera gemela (de un macho) estéril procede de un óvulo distinto aunque ambos —el del ternero y el de la ternera— ligados por una misma membrana coriónica que facilita el cruzamiento de los sistemas sanguíneos, y destaca la intervención de las hormonas en la diferenciación sexual. Son los años de los estudios de las fases del estro y del raspado vaginal para estudiar la mucosa.

Tres capítulos de la obra abordan el comportamiento, animal y humano. El conductismo de Watson, negador de la dualidad cuerpo-mente y reduccionista, se expresa en el análisis del estímulo-respuesta, del aprendizaje y la gama de variación de conductas en su trabajo con niños. Leonard Carmichael lleva el planteamiento a modelos animales (renacuajos) y desarrolla la función del estímulo externo en el despertar del instinto. Se definen tres escuelas, la que se orienta hacia el estudio del animal en su medio, la que ahonda las raíces nerviosas del comportamiento social de los vertebrados y la peculiar de los ornitólogos, donde los profesionales reciben particular ayuda de los aficionados; el enfoque ecológico sopesaba las correlaciones de la fisiología con el comportamiento del animal en su ambiente (importancia de los nutrientes y los factores limitantes en las relaciones dentro de la población y entre las poblaciones). Suponíase la viabilidad de la extrapolación del comportamiento animal a la conducta humana, e incluso a lo más característico de ésta, su capacidad mental. Se inquiere entonces el principio organizador, la convergencia entre el individuo y su medio, el fundamento biológico de las relaciones sociales, la explicación neuronal de los procesos mentales: un holismo emergente, en definitiva, que no siempre es antimecanicista.

Mejorar ese todo integrador supondría mejorar la calidad de la especie humana y controlar la sociedad. Es lo que quiso la eugenesia, movimiento que estuvo de moda en Europa y en los Estados Unidos en el primer tercio de nuestra centuria. Había que usar, defendía, la genética mendeliana, recién redescubierta, para remodelar la sociedad apartando de la reproducción a los "degenerados" y fomentando la descendencia de las castas "superiores". Garland E. Allen se acerca a las tesis, en puridad racistas, de los que se autoproclamaban paladines del progreso a través de la vida y la obra de Raymond Pearl; escoge esta figura porque se trata de un biólogo de reputación a ambos lados del Atlántico, fue adalid del movimiento eugenésico hasta 1925 y se volvió contra esa ideolo-



En la columna de la izquierda, de arriba abajo: O. Avery, J. Monod y A. D. Hershey y S. Benzer. En la derecha: (arriba) *N. Zinder,* (abajo) *S. Luria y M. Delbrück.*

gía cuando, científico honrado, comprobó que carecía de soporte genético. (En España, los defensores de la eugenesia, y quienes hasta hoy la han historiado, encontraron en la obra de Luis Huerta *Eugénica* su catecismo inspirador. Era éste una amalgama de frases rotundas y carencias genéticas, batida con una descripción embriológica rudimentaria, que silencia a los padres de la genética mendeliana, antagonistas, desde su disciplina, de tan obscuro maridaje: Morgan, Muller, Jennings. Y, por supuesto, a Pearl. Como tantas veces se repite desde el siglo pasado en nuestra historia, la ideología sectaria usó en vano el nombre de la ciencia y del progreso para enviar a las tinieblas exteriores a cuantos se opusieron.)

Los dislates de la eugenesia promovieron, por reacción más o menos directa, el apoyo a la investigación en genética humana para cuantificar en lo posible el componente hereditario de la conducta y la influencia del ambiente. A lo que hubo que sumar un factor propio de nuestro tiempo: el alcance de las mutaciones provocadas por las radiaciones. Estas alteraban la constitución química del código genético.

La química de la vida centra el empeño de los cuatro últimos capítulos, de los catorce de que consta, de *Chemical Evolution*, cuya tesis general se resume en que todo es química, ésta es una y se halla en evolución dinámica; en ella se encierra además, así confía, la clave de los misterios que todavía quedan por desvelar, el del origen prebiótico de las formas elementales de vida, por ejemplo.

Trenza la introducción y los primeros capítulos en torno a los elementos, "últimos componentes del análisis químico", que diría Antoine Lavoisier. Nace así la noción de especie química, autónoma y cerrada ante las demás, en oposición a las ideas transmutacionistas. Poco a poco van apareciendo otros conceptos decisivos en la interrelación entre especies: peso atómico, número atómico, proporción en la combinación, valencia, electronegatividad, tabla periódica, etcétera. Veintitrés elementos conocía Lavoisier; treinta y uno más se identificaron hasta 1830. El análisis espectroquímico de Robert Bunsen y Gustav Kirchhoff aportó una nueva técnica, muy eficaz, que permitía reconocer los elementos de una sustancia a través de líneas brillantes y definidas, de una longitud de onda característica de cada uno. La espectroscopía posibilitó conocer la composición de los cuerpos del universo. El jesuita Angelo Secchi clasificaba, en 1868, las estrellas: blancas, con cuatro líneas prominentes de hidrógeno; amarillas, con un espectro parecido al solar; rojas-anaranjadas, con bandas alternas de líneas obscuras y brillantes, y rojas débiles. Era la puntilla contra el *Cours de philosophie positive* de Comte, donde se asegura que habrá siempre cosas inaccesibles a la ciencia, como la composición química del Sol y las estrellas. La clasificación manifestaba, también, la evolución del cosmos y de sus elementos componentes.

Estos no eran tan últimos como parecía. El descubrimiento de la radiactividad instó una serie de refinamientos técnicos y teóricos que resultaron en la disociación y transmutación del átomo. Ernest Rutherford y Frederick Soddy desarrollaron la hipótesis de la desintegración de elementos pesados en elementos ligeros, con la desarticulación de la estructura del núcleo y la presentación de la cohorte de partículas. Y, unidas física y astrofísica a comienzos de siglo, se procede a desentrañar la edad y cuantía (concetración) de los elementos.

En el contar la historia, posee Mason un oficio fuera de lo común, sin ser profesional de la misma; aunque,

desde hace cuarenta años, va y viene con infiel fidelidad de aquélla a la estereoquímica. Se nota esa pericia cuando describe la génesis de las ideas y su contorno. Por ejemplo, cuando liga la concentración de los elementos con el conocimiento de la distancia de las estrellas y la correlación, de Russell y Hertzsprung, entre brillo absoluto del objeto celeste y temperatura de su superficie. De la cuantificación pasa a la síntesis de los elementos, con la enumeración razonada de los ocho procesos clásicos de Burbidges, Fowler y Hoyle. De aquí a la mensuración de la masa aportada por el medio interestelar, que nos suministra el 10 por ciento de la masa total de la galaxia, y de los granos de polvo interestelar (el uno por ciento de la masa de dicho medio). Salta, por acotamiento, al origen y composición de los sistemas planetarios, al solar, meteoritos (la importancia de las condritas carbonáceas), la Tierra.

Todo se ordena a la abiogénesis, y como de ésta nos hallamos *in albis*, a la química de la vida tal cual la conocemos, que ocupa más de la mitad del libro. A pesar de ser un relato de ideas desarrolladas por otros, hay un hilván sutil personal que se insinúa en el estudio de Pasteur y la generación espontánea (su negación y única posibilidad si la hubiera), se sumerge largas páginas para aparecer con fuerza en el último capítulo dedicado a la quiralidad de las moléculas biológicas. Mason, experto en óptica, sabe sacarle partido a esa propiedad, pero se queda a medio camino. ¿Por qué no le concede valor informativo, que daría mayor entidad a la selección natural, y que, darwinistamente hablando, mueve la historia de la vida?

A History of Experimental Virology está llamado a convertirse en el libro clásico de la materia. Desemboca también en la genética, a la que dedica más de la mitad de su extensión. Es una historia en el sentido más exigente del término, una arqueología de los conceptos, de los contextos, de los medios físicos y químicos que van emergiendo y apuntalando el siguiente paso hacia delante, hacia la definición de qué sea el virus.

Aporta lo preciso de la relación entre virus y biomedicina durante los 2000 años que precedieron a la constitución de la virología experimental: su asociación con las nociones de epidemia y miasmas, con la aceptación de la idea de generación espontánea, la realidad del contagio, el concepto de germen, etcétera. Hasta la entrada en escena de Pasteur y Koch.

Paulatinamente, a lo largo del siglo XIX, se han ido identificando distintos agentes patógenos, que Nägeli clasifica en tres grupos: mohos, levaduras y hongos de fisión (bacterias y esquizomicetes). Se disputa sobre el modo en que operaba el microorganismo en cuestión, si minando al organismo huésped o si segregando toxinas. Esta segunda vía se había comprobado, a finales de siglo, en la difteria, tétanos, cólera y estafilococos; dato que nos evoca, indirectamente, el avance experimentado en inmunología e higiene. Por entonces, se estaba de acuerdo en que existía un agente causal, morfológica y fisiológicamente característico, para cada infección, y se conocían ya una veintena aproximada de éstas.

Menos asentada estaba la naturaleza del agente. Su descubrimiento es el del tránsito del concepto de bacteria al de virus, que no dependió tanto de una profundización teórica cuanto de un refinamiento de los medios experimentales: físicos (filtración, centrifugación, adsorción, electroforesis, métodos ópticos de iluminación ultravioleta de campo obscuro y otros), bioquímicos (metabolismo de los bacteriófagos), citológicos e inmunológicos. Su firme progreso, ya iniciado el siglo XX, permitió encarrilar la investigación hacia la definición de esa partícula, a caballo entre la vida y lo inerte, entre el carácter escuetamente proteínico de las primeras descripciones y el contenido nucleotídico de su núcleo.

Es el terreno donde ha crecido la genética molecular, cuyos microorganismos de laboratorio por excelencia serán los bacteriófagos. Experimenta ésta un desarrollo esplendoroso en los años sesenta y setenta, para cobrar nuevo impulso en los ochenta con la nueva línea del ADN recombinante. La historia de las dos primeras décadas mencionadas se relata en *The emergence of bacterial genetics*.

Diríase que Brock, tras estudiar durante años los documentos —artículos, libros, correspondencia—, ha cerrado los ojos y se ha puesto a reflexionar: ¿cuál es el campo de la genética bacteriana, en qué pilares se asienta, cúyos los conceptos vertebradores? Y como las ideas nacen de la mente humana, no ha descuidado filiaciones y dependencias. Pero ha huido de la narración cronológica y del culto a la personalidad. En lo que de camino a seguir pueda tener, me parece muy aconsejable para acometer la historia de la ciencia contemporánea.

Las columnas atlánticas de la genética bacteriana son la genética clásica, mendeliano-morganiana, y la bacteriología con su extensión histórica en la virología; de esta última Grafe nos ha dicho cuanto necesitábamos saber. La genética clásica se conforma a lo largo del primer tercio de nuestro siglo. Tras los antecedentes remotos de Mendel, que introduce la matemática en biología, señala la naturaleza discreta de los caracteres y distingue la duplicidad de un mismo factor (dominante y recesivo), y de Darwin, con su hipótesis de la pangénesis, los hitos se personifican en De Vries, que destaca la importancia de la mutación, Bateson, a quien debemos la discontinuidad de la variabilidad, Johannsen, sistematizador de la nueva ciencia (dio nombre y contenido al gen, genotipo y fenotipo), Garrod, descubridor del carácter hereditario de errores o deficiencias enzimáticas del metabolismo, y, por encima de todos, Morgan, cuya escuela (en Columbia y en el Instituto de Tecnología de California) puso los fundamentos de la herencia en la teoría cromosómica y de la mutación.

Las cuestiones cardinales de la genética bacteriana son la de la mutación, la determinación de la sexualidad, los bacteriófagos, la lisogenia, la transducción, la transformación, la expresión y regulación génicas. Constituyen el cuerpo del libro. En cada idea matriz, que el autor va encadenando, se define la génesis de la misma con el experimento decisivo que permite su cristalización teórica. A modo de telón de fondo, seis pruebas cruciales, aportadas ya en la introducción.

La coda de estos cuatro libros recientes podría dárnosla Lwoff: "Para muchos de nuestros jóvenes científicos, el futuro importa más que el pasado y la historia de la ciencia comienza mañana... se descubren muchos hechos y enfoques teóricos que aparecieron años ha. Se nos antoja, pues, deseable reconocerles a esos profesionales lo suyo y ahorrarnos el tiempo y el esfuerzo de los redescubrimientos. Además, interesa saber de qué modo se descubrieron nuevos fenómenos, cómo surgieron, se abordaron y resolvieron los problemas, y cómo evolucionaron nuestros conceptos." Lwoff pensaba, lógicamente, en los buenos manuales y en los buenos historiadores. Estas cuatro obras, con algunos reparos ajenos a la ciencia, le hubieran gustado. (L. A.)

Apuntes

En ciencia no deben ponerse puertas al campo. Desde la segunda mitad del siglo XIX uno de los dominios más activos de la investigación ha sido el de la química de las estrellas y sol. No suele citarse, sin embargo, que escasos años antes, Auguste Comte (1798-1857) proclamaba rotundo en su *Cours de philosophie positiviste* que había cuestiones cerradas para siempre a la inquisición humana, y daba como ejemplo obvio la astroquímica. La verdad es que sus intuiciones no resultaron muy afortunadas: creía en la existencia de habitantes en otros planetas del sistema solar, que serían, hasta cierto punto, nuestros conciudadanos.

Se ha venido suponiendo la inclusión de granulaciones de cuarzo en el pedernal, el ágata y muchas formaciones minerales más. Pero el análisis con microscopio electrónico de más de 150 muestras procedentes de puntos muy dispares ha revelado que del 10 al 80 por ciento no era cuarzo, sino otra sílice polimorfa: la moganita. Abunda ésta entre las muestras recogidas en ambientes alcalinos y desaparece en las que han sufrido alteraciones hidrotérmicas.

Sigamos con el cuarzo. Los minerales de impacto, el cuarzo es uno de ellos, se han hallado en el estrato de arcilla del límite entre el Cretácico y el Terciario. Para comprobar si otras extinciones en masa están asociadas con un episodio de impacto se han buscado esos minerales en rocas que definen otros límites. El resultado ha sido positivo en tres estratos del límite entre el Terciario y Jurásico, frontera que señala grandes extinciones marinas y terrestres.

La naturaleza viva es una apasionada de la geometría. Fijémonos en la inclinación de la biología molecular por los nudos. Los breves segmentos de ADN circular con que suelen trabajar bioquímicos y genéticos adoptan formas anudadas, que el microscopio electrónico nos ha revelado en todo su despliegue: nudos triples, cuadrados, catenarias. Las topoisomerasas de tipo II son enzimas que transforman un nudo en otro en un alarde de habilidad marinera; las topoisomerasas de tipo I intervienen en el superenrollamiento del ADN, suerte de remedo del hilo telefónico que se retuerce en busca de una estructura más estable. Los químicos, entre la envidia y la admiración, se han aprestado desde hace escasos años a crear sus propios nudos en las moléculas que sintetizan.

Los genes homeobox constituyen una verdadera caja de sorpresas. Desde su identificación a mediados de los años ochenta, hemos aprendido, primero, que codifican una secuencia de 60 aminoácidos (la "homeobox") que persiste en la escala de los seres, desde la mosca del vinagre hasta los humanos; segundo, que poseen la clave del desarrollo embrionario, y, ahora, que instan la diversidad sobre la que opera la selección, y, por ende, la evolución.

Se ha creado un material compuesto ("composite") que puede conducir selectivamente electricidad en direcciones privilegiadas. Se tomaron perlas de níquel, de unos 20 micrometros de diámetro, revestidas de oro o plata y mezcladas con silicona ópticamente transparente; se sometieron finas películas de la mezcla a un campo magnético, que alineó las esferas en columnas a modo de alambres en miniatura a través de la película. El material podría destinarse a conmutadores sensibles a la presión, como las pantallas sensibles al tacto.

El marcaje de ciertas progenitoras de neuronas corticales cerebrales de embriones de rata con una sustancia retrovírica ha puesto de manifiesto que muchas neuronas de parentesco clonal se dispersan por distintas áreas funcionales del cerebro en desarrollo. Nos demuestra esa clase de experimentos que la determinación funcional de distintas áreas cerebrales —visión y audición, por ejemplo— se desarrolla después de la neurogénesis.

Las emisiones de aerosoles, de sulfatos en particular, han crecido de forma espectacular a lo largo de los últimos cien años. A diferencia de los gases de invernadero, los aerosoles rebajan la temperatura global dispersando la luz solar incidente. Pero no es fácil comprender la complejidad del transporte y de las reacciones en que toman parte. Ello no obstante, los cálculos provisionales igualan el enfriamiento provocado por los aerosoles al calentamiento neto causado por las emisiones antropógenas de gases de invernadero.